

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Návrh a analýza distribuční sítě IT pokládkového lodního  
systému**

**Technical Project and Analysis of Distribution Network IT  
on pipelay systems**

2015

Bc. David Tomešek

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Tomešek**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Návrh a analýza distribuční sítě IT pokládkového lodního systému**  
**Technical Project and Analysis of Distribution Network IT**

### Zásady pro vypracování:

1. Základy pokládkového systému, popis jednotlivých technologických celků.
2. Teoretický rozbor IT sítí
3. Uzemnění, ochranné vodiče a vodiče ochranného pospojování v IT sítích
4. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909 a IEC 61363
5. Výkonová bilance v síti
6. Návrh stejnosměrné distribuční sítě
7. Návrh a dimenzování systému pohonů, brzdných odporů a UPS
8. Analýza a porovnání zkratových poměrů dle IEC 61363 a ČSN EN 60909

### Seznam doporučené odborné literatury:

1. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. Montanex a.s., Ostrava, 2008.
2. Trojánek, Z.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987.
3. Pauza, J., Krychtánek, Z.: Elektrické stanice. SNTL Praha, 1989.
4. Santarius P.: Elektrické stanice a vedení. Skripta VŠB Ostrava, 1993.
5. Horák, K.: Výpočet elektrických sítí. SNTL Praha, 1980.
6. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat všem, kteří mi poskytli odbornou pomoc, cenné rady a navedli mne správným směrem k vypracování mé diplomové práce. Jmenovitě si velké díky zaslouží pan doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec a Ing. Ondřej Hudák.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 5. 5. 2015

David Tomešek:.....

## **Abstrakt:**

Diplomová práce je zaměřena výpočtům systémům na lodi s instalovaným systémem pokládky potrubí na mořské dno. V úvodu práce je pojednání o těchto systémech a jejich využití. Následují teoretické části, jež jsou věnovány potřebným vztahům a souvislostí ke stanovení výkonové bilance a zkratové odolnosti. Práce se zabývá problematikou IT sítí, uzemnění, pohony s brzdnými rezistory a také záložními zdroji UPS.

V návrhové a analytické části došlo k ověření předpokladů a zhodnocení, zda soustava vyhoví zkratovým proudům.

## **Klíčová slova:**

Sítě IT, přenos a rozvod energie, pohony, zkrat, ČSN EN 60909-0, IEC 61363-1, zkratový proud, měnič kmitočtu, jeřáb, loď, energetická bilance, pokládka potrubí, uzemnění, stejnosměrný meziobvod, brzdné rezistory, záložní zdroje, UPS.

## **Abstract:**

My diploma thesis focuses on calculations on ship with installed pipelaying systems. In the beginning is an explanation of these systems and their usage on the ships. This is followed by theoretical parts, which is dedicated to formulas and connections necessary to determine load balance and short circuit resistance. There is also focus on IT networks, grounding, drives with brake resistors and also backup supply UPS.

The design and analytical part was to verify the assumptions and evaluate whether the system meets short circuit current requirements.

## **Key words:**

IT networks, power distribution, drives, short circuit, ČSN EN 60909-0, IEC 61363-1, short circuit current, frequency converters, cranes, vessel, load balance, pipelay systems, grounding, DC interlink, brake resistors, UPS - uninterruptible power supply

## Seznam použitých symbolů

$I_d$	Proud první poruchy [A]
$R_A$	Součet odporu zemniče a ochranného vodiče [ $\Omega$ ]
$Z_S$	Impedance poruchové smyčky L1 a PE [ $\Omega$ ]
$Z'_S$	Impedance poruchové smyčky N a PE [ $\Omega$ ]
$I_a$	Vypínací proud ochranného prvku [A]
$t$	Doba [s]
$k_v$	Bezpečnostní součinitel pro vypočtenou impedanci [-]
$k_m$	Bezpečnostní součinitel pro změřenou impedanci [-]
$U_0$	Jmenovité fázové střídavé napětí [V]
$U$	Jmenovité sdružené střídavé napětí [V]
$I_k$	Efektivní hodnota zkratového proudu [A]
$i_k$	Okamžitá hodnota zkratového proudu [A]
$i_{ss}$	Stojnosměrná složka zkratového proudu [A]
$I_{km}$	Nárazový zkratový proud [A]
$i_p$	Nárazový zkratový proud [A]
$I_k''$	Počáteční rázový zkratový proud [A]
$S_k''$	Počáteční rázový zkratový výkon [VA]
$i_{dc}$	Stojnosměrná složka zkratového proudu [A]
$i_{ac}$	Střídavá složka zkratového proudu [A]
$A$	Počáteční hodnota stojnosměrné složky $i_{d.c}$ [A]
$Z_{(1)}$	Sousledná zkratová impedance [ $\Omega$ ]
$Z_{(2)}$	Zpětná zkratová impedance [ $\Omega$ ]
$Z_{(0)}$	Netočivá zkratová impedance [ $\Omega$ ]
$R_L$	Odpor vedení [ $\Omega$ ]
$k_s$	koeficient současnosti [-]
$k_z$	koeficient zatížitelnosti [-]
$\beta$	Koeficient soudobosti [-]
$\varphi$	Fázový úhel [ $^\circ$ ]
$\omega$	Úhlová rychlost [ $\text{rad.s}^{-1}$ ]
$\eta$	Účinnost [-]
$p$	Počet pólových dvojic elektrického stroje [-]
$Z_K$	Zkratová impedance trojfázové soustavy [ $\Omega$ ]
$E''$	Rázové napětí synchronního stroje [V]
$E'$	Přechodné napětí synchronního stroje [V]

## Seznam použitých zkratek

AC	Střídavé napětí či proud
DC	Stejnoseměrné napětí či proud
IEC	International Electrotechnical Commission - Mezinárodní elektrotechnická komise
ČSN	Česká technická norma
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvlášť vysoké napětí
mt	metrická tuna - 1000kg
HIS	Hlídač izolačního stavu
GPS	Global positioning systems
UPS	Uninterruptable power supply
ANSI	American National Standards Institute - americká standardizační organizace
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
HPU	Hydraulic power unit – generátor hydraulického tlaku

# Obsah

Úvod:	1
1 Základy pokládkového systému, popis jednotlivých technologických celků	2
1.1 Pokládání potrubí	2
1.2 Metody pokládání potrubí	2
1.2.1 S-lay	2
1.2.2 J-lay	3
1.2.3 Reel-lay	4
1.2.4 Flex-lay	4
1.3 Součásti systémů pro pokládání potrubí	5
1.3.1 Lod'	5
1.3.2 Tensioner	5
1.3.3 Pipe Straightener - Aligner	6
1.3.4 Jeřáb	6
1.3.5 Carousel nebo basket	7
1.3.6 Winches	7
1.3.7 Moonpool	8
2 Teoretický rozbor IT sítí	9
2.1 Druhy elektrických sítí	9
2.2 Sítě IT	12
2.3 Hlídač izolačního stavu	15
3 Uzemnění, ochranné vodiče a vodiče ochranného pospojování v sítích IT	16
3.1 Uzemnění	16
3.2 Zemní spojení	16
3.3 Uzemnění na lodích	17
3.3.1 Vodiče ochranného pospojování:	18
4 Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909-0 a IEC 61363-1	19
4.1 Zkrat	19
4.1.1 Průběh zkratového proudu	19
4.2 Metodika dle ČSN EN 60909-0	21
4.2.1 Rozsah platnosti	21
4.2.2 Definice [1]	21
4.2.3 Předpoklady výpočtu [1]	22
4.2.4 Druhy zkratů	23
4.2.5 Metody výpočtu – Metoda napětového zdroje v místě zkratu	24

4.2.6	Metody výpočtu - Metoda souměrných složek [1].....	25
4.2.7	Maximální zkratové proudy[1].....	27
4.2.8	Minimální zkratové proudy[1] .....	27
4.2.9	Zkratová impedance elektrických zařízení[1] .....	28
4.2.10	výpočet zkratových proudů [1].....	33
4.3	Metodika dle IEC 61363-1 .....	35
4.3.1	Předpoklady výpočtu.....	35
4.3.2	Výpočet třífázového zkratového proudu .....	35
5	Výkonová bilance v síti.....	40
5.1	Teorie .....	40
5.2	Load balance .....	40
6	Návrh stejnosměrné distribuční sítě .....	46
6.1	Společná stejnosměrná síť .....	46
6.2	Dimenzování stejnosměrné sítě.....	48
6.3	Využití stejnosměrných sítí v budoucnu .....	51
7	Návrh a dimenzování systému pohonů, brzdných odporů a UPS .....	53
7.1	Pohony a soustavy pohonů .....	53
7.1.1	Dimenzování pohonů .....	53
7.2	Brzdné rezistory .....	55
7.2.1	Dimenzování brzdného rezistoru.....	56
7.3	UPS .....	59
7.3.1	Parametry záložního zdroje .....	59
7.3.2	Dimenzování záložního zdroje.....	60
8	Analýza a porovnání zkratových poměrů dle IEC 61363-1 a ČSN EN 60909-0 .....	62
8.1	Výpočet zkratových poměrů .....	62
8.2	Analýza sítě dle SKM POWER TOOLS.....	63
8.2.1	Porovnání výsledků .....	66
	Závěr .....	67
	Seznam literatury .....	69
	Seznam obrázků .....	70
	Seznam tabulek .....	72
	Seznam příloh.....	73



## Úvod:

Elektrizační soustava na velkých lodích je provozována jako síť IT, ve které jsou fázové vodiče odděleny od země přes velkou impedanci, případně izolovány úplně. Je to z důvodu větší spolehlivosti této sítě. Jelikož při první poruše, kdy by v důsledku poškození izolace kabelů došlo k dotyku fáze se zemí, nedojde ke zkratu, ale vznikne nám pouze poruchový stav, diagnostikovaný pomocí tzv. hlídače izolačního stavu. Ten nás při poklesu izolačního odporu varuje opticky i akusticky, ale neodpojí síť od zdroje. Každopádně je nutné okamžité řešení této situace, protože při výskytu druhé poruchy může vzniknout zkrat, díky kterému mohou být na neživé části zařízení zavlečena nebezpečná dotyková napětí. Každý vzniklý zkrat je také nebezpečný z důvodu tepelných a dynamických účinků, které mohou způsobit velké škody jak na majetku, tak na zdraví osob vyskytujících se v těsné blízkosti. Navíc výrazný pokles napětí může být příčinou narušení stability chodu generátorů, což je další nebezpečný následek zkratů, neboť postihuje provoz celé elektrizační soustavy. Obzvláště na lodi, která pracuje pouze z vlastních dieselagregátů. I přes tyto výhody sítě IT nejsme schopni zabránit zkratu mezi jednotlivými fázemi, který se v případě kabelových vedení, díky přeskočení oblouku na nezasaženou fázi, okamžitě mění na zkrat třífázový. Aby zařízení, ve kterém by takový zkrat vzniknul, nebylo nenávratně zničeno, musí být navrženo a jištěno takovým způsobem, aby nedošlo k překročení konstrukčních mezí materiálů, ze kterých je vyrobeno. Pokud budou tyto podmínky splněny, tak by zkrat neměl ohrozit celou soustavu a vypnutí by měl selektivně obstarat nadřazený jističí prvek.

Navíc, na rozdíl od běžných instalací na pevnině, platí na moři jisté výjimky. Pro mobilní a námořní aplikace je určena norma IEC 61363-1, která zatím nemá český ekvivalent. Ve výpočtech oproti normě ČSN EN 60909-0 neuvažuje nesouměrné zkraty a také jsou zde uvažovány rozdílné příspěvky asynchronních motorů a synchronních generátorů. Důvod k zavedení normy IEC 61363-1 byl díky poměrně velkému výkonu generátoru umístěných na malém prostoru lodi.

V praktické části této práce je dle výše zmíněných norem provedena analýza zkratových poměrů sítě 440V, 60Hz pomocí specializovaného softwaru SKM Power Tools. Další část práce obsahuje požadavky pro podpůrné technologie, a tím přináší komplexní přehled týkající se návrhu takových systémů. V další části je navrženo řešení záložního zdroje UPS, a také návrh soustavy pohonů, včetně brzdných rezistorů.

# **1 Základy pokládkového systému, popis jednotlivých technologických celků**

## **1.1 Pokládání potrubí**

Lodě s instalovaným systémem pokládky potrubí, jsou speciálně navrženy pro pokládání potrubí a kabelů na mořské dno. Slouží k propojení ropných vrtů mezi sebou a také mezi hlavní ropnou plošinou, případně s pobřežní stanicí. Ke splnění těchto úkolů má typická pokládková loď mnoho přídatných zařízení, jako speciální jeřáby s velmi vysokým zatížením, schopné manipulovat s velmi těžkými břemeny na mořském dně. Přídatné jeřáby sloužící ponorným robotům, schopných manipulace s konci potrubí a jejich napojování na vrty na mořském dně apod.

Pokládkové lodě využívají tzv. dynamic positioning system (což je přesné zachování pozice dle GPS, a sensorů ve spolupráci s pomocnými motory v trupu lodi.) nebo využívají speciální kotvicí mechanismy, které zajistí správnou pozici a případně rychlost při pokládání potrubí.

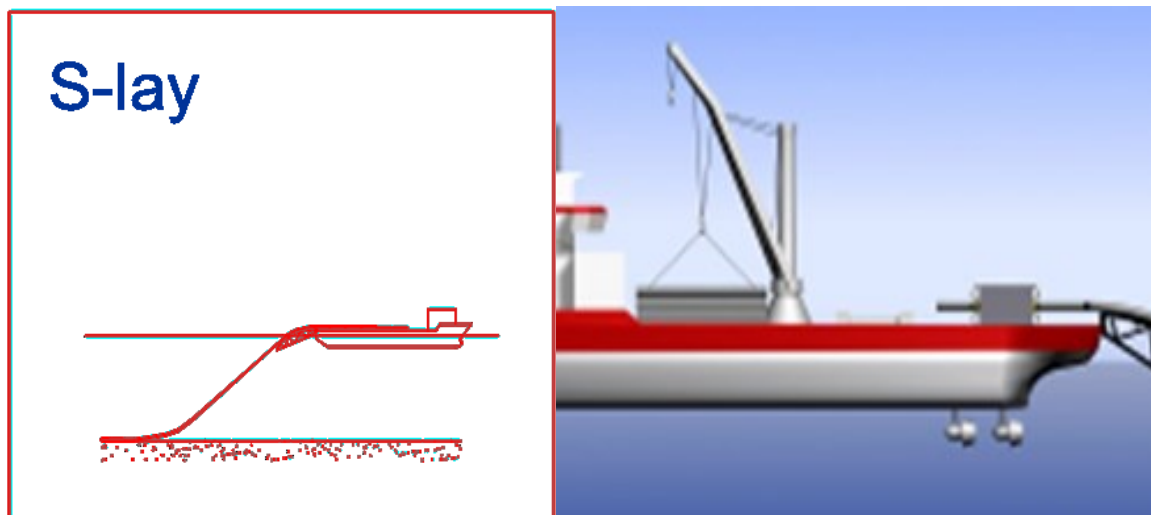
Ke dnešnímu datu je na mořském dně uloženo až 250 000 km<sup>[15]</sup> kabelů či potrubí. A to v hloubkách, až 3000m. Nejdelší plynové potrubí položené na mořském dně je mezi Ruskem a Německem s délkou 1222km a průměrem 1,22 m

## **1.2 Metody pokládání potrubí**

Pokládkové metody zahrnují typické 4 metody, jako je S-lay, J-lay, Reel-lay, Flex-lay

### **1.2.1 S-lay**

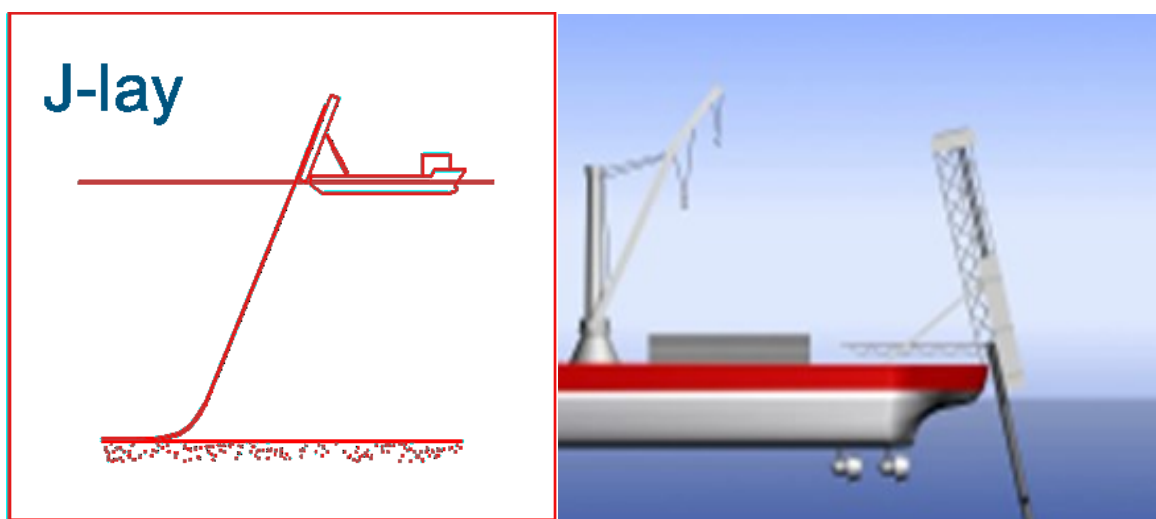
Tato metoda je nejužívanější pro pokládku velkých průměrů potrubí v hloubkách do 1km. potrubí lze pokládat jak z klasické koncepce lodí tak z poloponorných. Samotné označení S-lay vychází z dvojitého prohnutí potrubí při pokládce (připomíná písmeno S). Touto metodou lze pokládat potrubí i do větších hloubek, ale je zde nutný relativně dlouhý stinger – což je konstrukce zavěšená za loď, která podpírá spouštěnou trubku ve vodě a nastavuje poloměr ohybu, aby nedošlo k deformacím této pokládané trubky.



*Obr. 1: Metoda S-lay*

### 1.2.2 J-lay

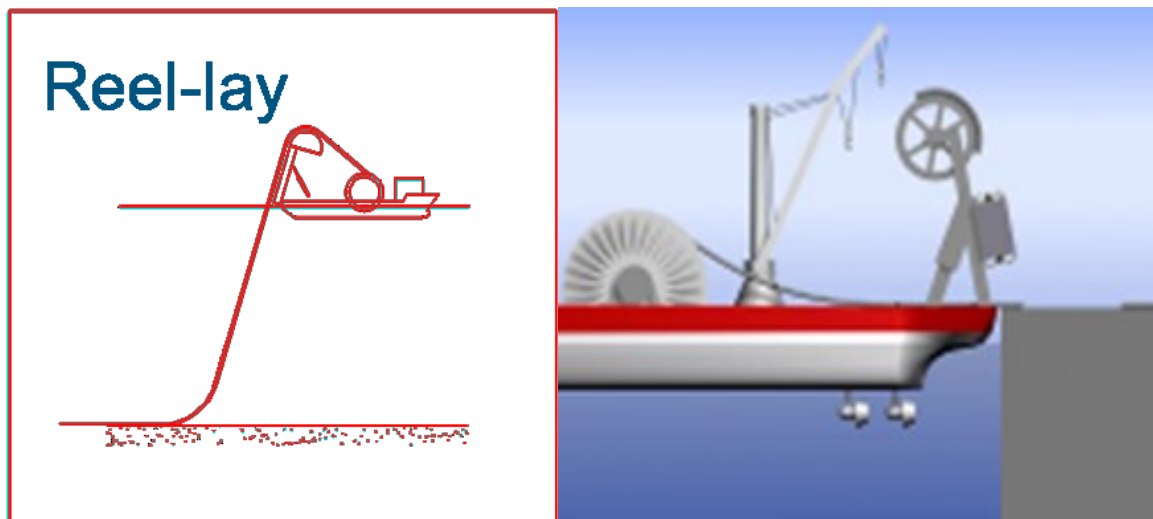
Název systému J-lay je také odvozen od tvaru písmene „J“, který zaujímá potrubí při pokládání. Tento systém se používá pro pokládání do nejvyšších hloubek a rampa, na které se trubky vertikálně svařují má až 72m. náklon této rampy je variabilní a kopíruje přesně hloubku, ve které se klade. Výhoda této metody je, že se potrubí ohýbá pouze u mořského dna a tak lze pokládat velmi pevné a neohebné potrubí.



*Obr. 2: Metoda J-lay*

### 1.2.3 Reel-lay

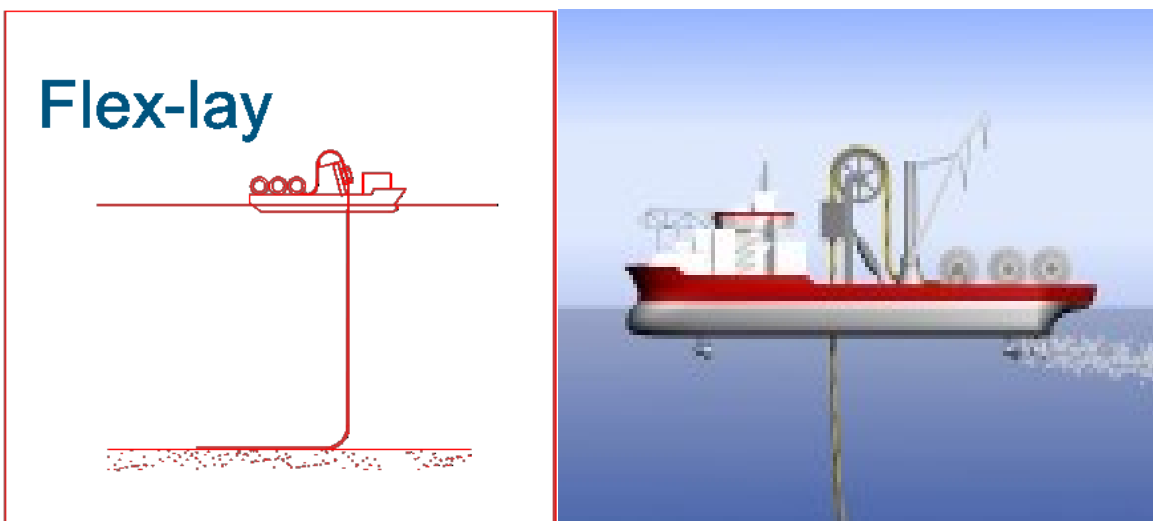
Tato metoda, je založena na odvíjení z velkého karuselu s až 20m průměrem, na kterém je navinuta už svařená a připravená trubka, která se odvíjí přes speciální mechanismus a tím lze dosáhnout velmi velké rychlosti pokládání. Toto je velká výhoda, která šetří čas i peníze. Protože se potrubí svaňuje na pevnině. Omezení jsme ale průměrem potrubí.



*Obr. 3: Metoda Reel-lay*

### 1.2.4 Flex-lay

Systém Flex-lay se používá pro instalaci pružného přívodního potrubí, stoupacích trubek, a také podpůrných kabelů v hlubokých vodách. Výhoda je podobně jako u metody Reel-lay rychlost pokládky, a dosažitelnost velmi velkých hloubek. Nevýhodou je ještě menší možný průměr potrubí.



*Obr. 4: Metoda Flex-lay*

## 1.3 Součásti systémů pro pokládání potrubí

### 1.3.1 Lod'

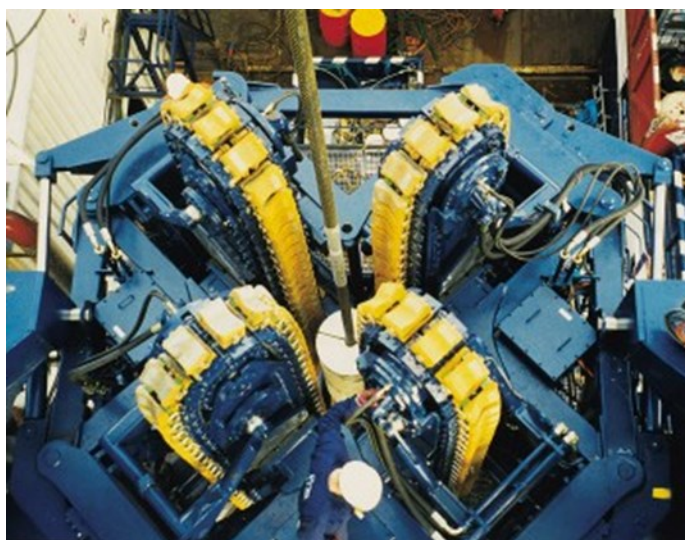
Požadavky na loď jsou dány především velikostí a druhem systému, který bude pokládat potrubí. Výroba samotné lodi trvá několik let, a proto musí být předem známy všechny detaily o instalovaném zařízení na palubě.



*Obr. 5: Loď s instalovaným systémem pokládky*

### 1.3.2 Tensioner

Neboli napínač trubek, je umístěn obvykle ve dvojici vertikálně na rampě, a má za úkol přesné odvíjení a držení celé váhy potrubí. Na palubě může být umístěn menší horizontálně umístěný spooling tensioner, který slouží k udržování konstantního tahu při odvíjení potrubí ze zásobníků.



*Obr. 6: 250mt tensioner*

### 1.3.3 Pipe Straightener - Aligner

Neboli vyrovnávač trubek. Toto zařízení slouží k vyrovnání trubek po odvíjení ze zásobníků. Odstraňuje pnutí a prohnutí. Skládá z velkého kola, které navádí trubku na obvykle dva pojezdy.



*Obr. 7: Pipe straightener*

### 1.3.4 Jeřáb

Na lodi je většinou více jeřábů, jeden je obvykle určen pro velkou tonáž až 5000mt, potřebných pro instalaci speciálních stanic na mořském dně nebo nakládku karuselů s připraveným potrubím k pokládce. Pro provozní zdvihy je loď vybavena jeřáby s nosností od 2 – 150mt.



*Obr. 8: Jeřáb se zalomeným výložníkem 120mt*



### 1.3.5 Carousel nebo basket



Karusely se od basketů liší pracovní polohou, zatímco velký basket je umístěn v podpalubí a osa rotace je vertikální, karusely jsou většinou umístěny přímo na palubě ve skupině tak, že jejich osa rotace je horizontální. Oba tyto druhy se používají k uskladnění potrubí a kabelů na palubě lodi. Největší z basketů, mají průměr více, než 23 metrů jsou určeny pro uskladnění až 3500t trubek.

*Obr. 9: Basket v podpalubí*

### 1.3.6 Winches

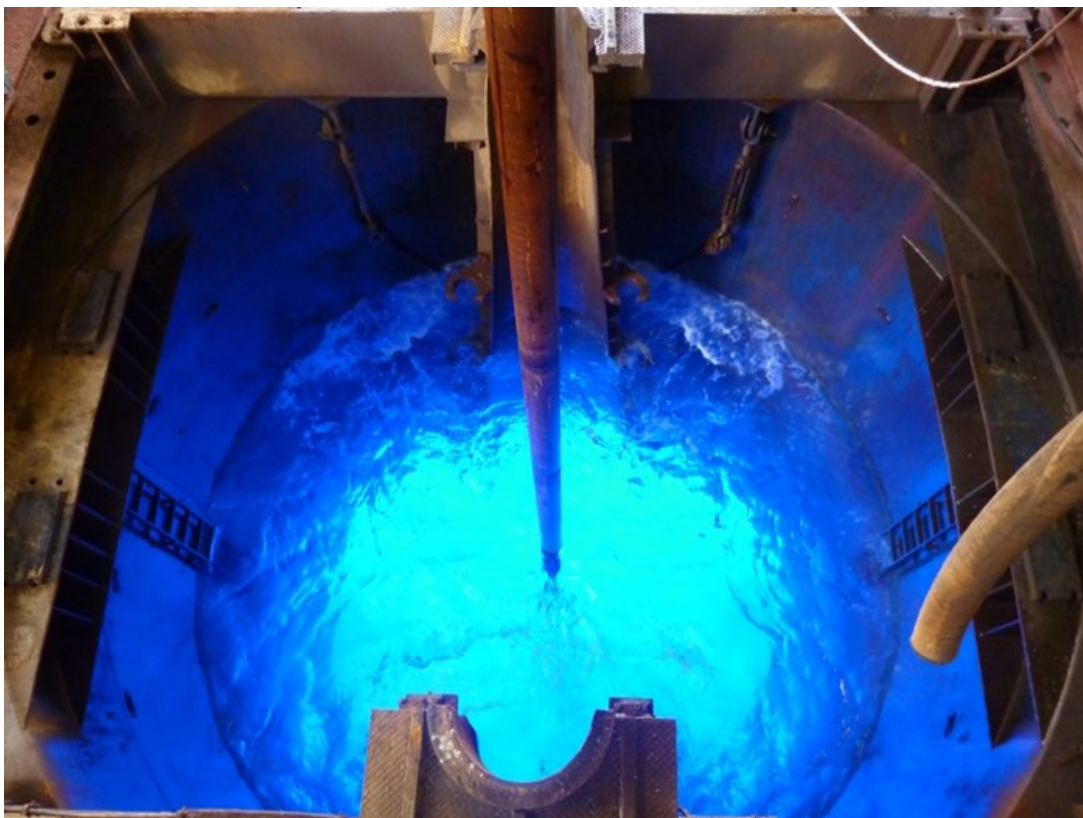
Neboli navijáky jsou mechanické zařízení používané ke zdvihání a spouštění břemen, stejně tak zahrnují pomocné zařízení zajišťující konstantní napnutí lana. Navijáků je více druhů a mezi nejdůležitější patří tzv. Traction winch, spolupracující se storage winch, na kterém je namotáno samotné lano. Traction winch slouží k udržování konstantního tahu díky tření mezi několika náviny lana na dvou bubnech tahajících lano mezi sebou. Tento systém je spojován s označením A&R, což znamená Abandon and Recovery, lze přeložit jako upustit a zvednout. Jak již název napovídá na ocelovém laně zavěšený konec potrubí je položen na mořské dno, kde může být tímto systémem opětovně vyzvednut. Délka ocelového lana ve storage winch je až 3500m, síla v tahu odpovídá 380mt.



*Obr. 10: Traction Winch*

### 1.3.7 Moonpool

Je to průchod procházející trupem lodi, který zajišťuje přístup k hladině přímo z paluby lodě. Je umístěn pod rampou a je to vlastně prostor, kterým je trubka spouštěna do moře. V horní části uzavřen konstrukcí nazývanou moonpool hatch – je to kryt, který se rozevře dle průměru trubky.



*Obr. 11: Moonpool*



## 2 Teoretický rozbor IT sítí

### 2.1 Druhy elektrických sítí

Elektrickou síť tvoří soustava obvodů sloužících k napájení připojených elektrických zařízení, napájená z téhož zdroje. Přitom nejde jen o prvotní zdroj (generátor apod.), nová síť vzniká i vřazením transformátoru, měniče frekvence apod., jsou-li části s napětím odděleny spolehlivou izolační bariérou od napájecí soustavy. Způsob provedení a použitelnost některých druhů ochrany před úrazem el. proudem však úzce souvisí s tím, zda je zdroj sítě od země izolován či je některý z vodičů soustavy (zpravidla uzel) uzemněn. Proto jsou pro označování sítí zavedeny písmenové označení – zkratky [12].

Stanovená označení druhu sítí mají tento význam: [12]

#### a) První písmeno

T - terre (franc.) - bezprostřední uzemnění určitého bodu obvodu pracovního proudu, zpravidla uzlu (nulového bodu)

I - insulation (angl.) - izolace všech živých vodičů vůči zemi nebo spojení bodu sítě se zemí přes velkou impedanci

#### b) Druhé písmeno

N - nutre (franc.), neutral (angl.) - bezprostřední spojení neživých částí s uzemňovacím bodem sítě ochranným vodičem

T - terre ( franc.) - uzemnění neživých částí nezávisle na možném uzemnění určitého bodu sítě

#### c) Třetí písmeno

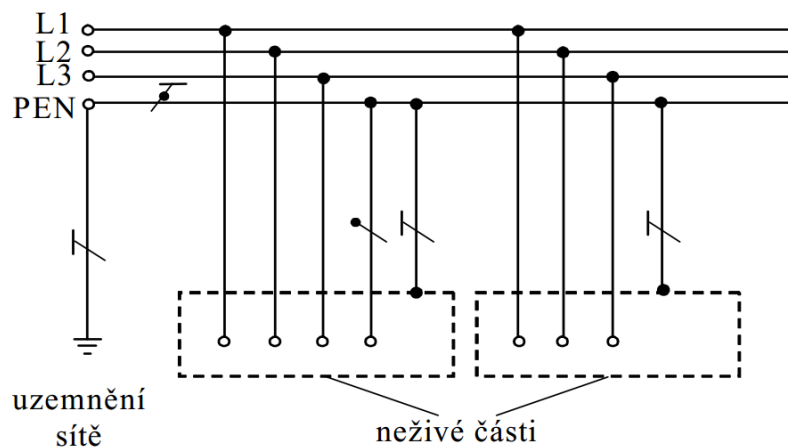
C - kombiné (franc.), combined (angl.) - kombinace středního vodiče s ochranným vodičem

S - separé (franc.), separated (angl.) - oddělení středního vodiče od ochranného vodiče

Dále jsou uvedeny příklady označování rozvodných soustav nízkého napětí střídavých a stejnosměrných.

### Síť TN-C

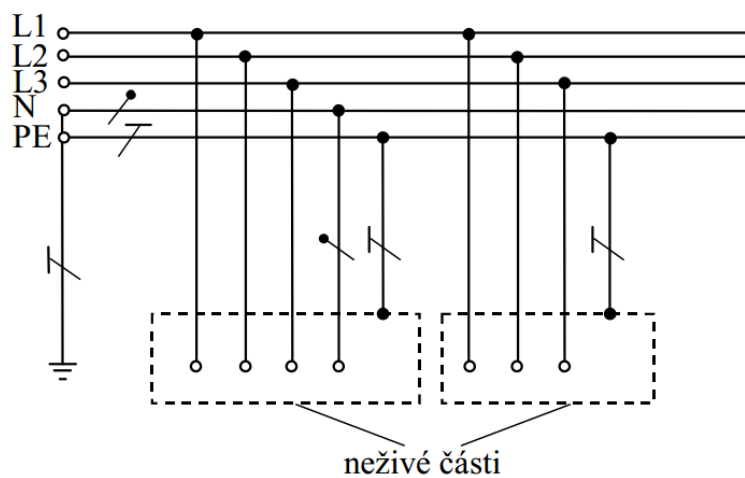
Funkce nulového (středního) a ochranného vodiče je v celé síti sloučena do jediného vodiče.



Obr. 12: Střídavá síť TN-C [12]

### Síť TN-S

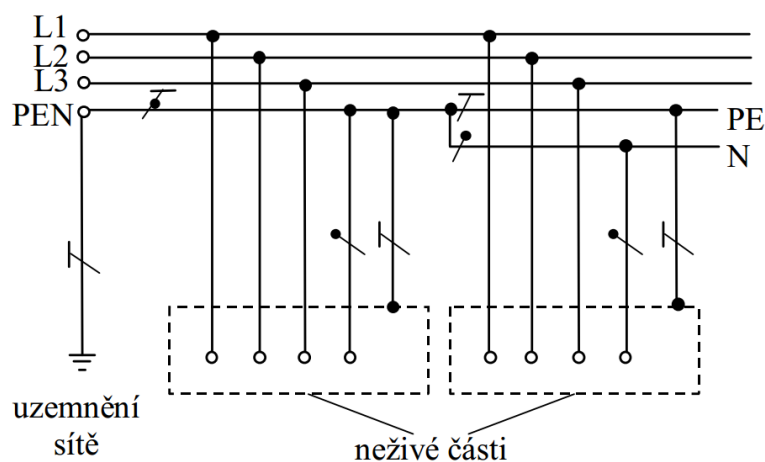
Trojfázová síť s uzemněným nulovým bodem, ochranný vodič (PE) a nulový (střední) vodič (N) jsou vedeny odděleně



Obr. 13: Střídavá síť TN-S [12]

### Síť TN-C-S

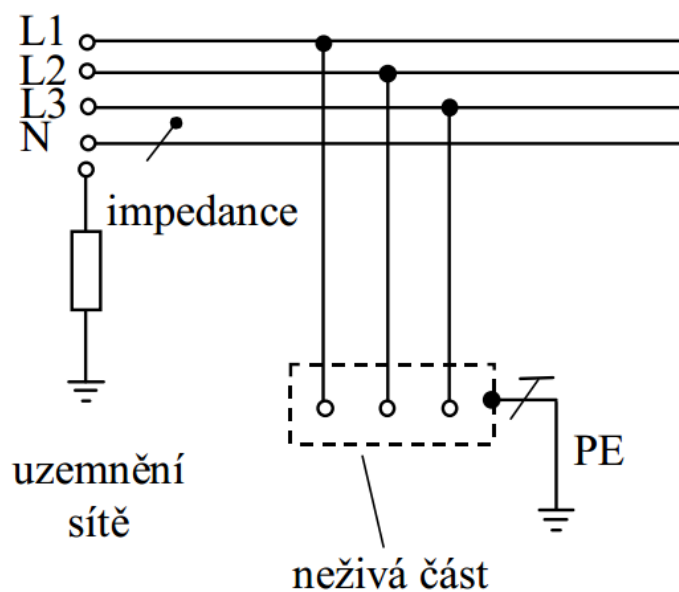
Trojfázová síť s uzemněným nulovým bodem, funkce části nulového (středního) a ochranného vodiče je sloučena v části sítě do jednoho vodiče. [12]



Obr. 14: Střídavá síť TN-C-S [12]

## Síť IT

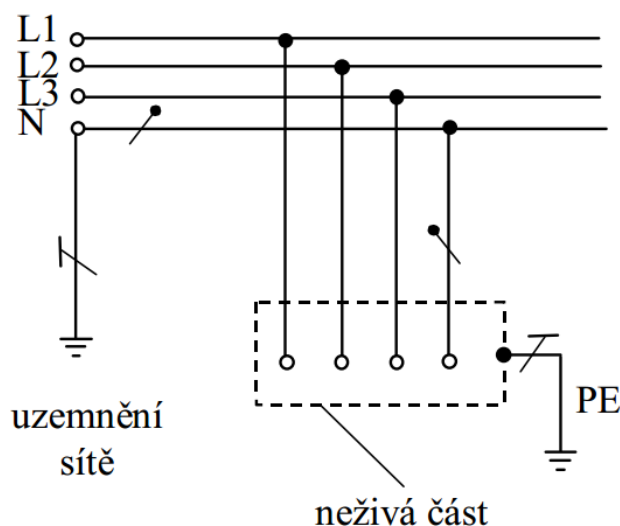
Trojfázová síť izolovaná, popřípadě uzemněná přes impedanci nebo průrazku, ochrana neživých částí před nebezpečným dotykovým napětím je provedena odpojením od zdroje samostatným uzemněním každého spotřebiče. (Síť může být úplně oddělena od země). [12]



Obr. 15: Střídavá síť IT [12]

## Síť TT

Síť TT má jeden bod přímo uzemněný a neživé části připojených elektrických zařízení jsou v této síti spojeny se zemí nezávislými na zemních sítích. [12]



Obr. 16: Střídavá síť TT [12]

## 2.2 Síť IT

V sítích IT musí být živé části izolovány od země nebo spojeny se zemí přes dostatečně vysokou impedanci. Toto spojení může být provedeno buď v nulovém nebo středním bodě sítě nebo v umělém nulovém bodě. Umělý nulový bod může být přímo spojen se zemí, jestliže výsledná impedanci proti zemi je při frekvenci sítě dostatečně vysoká. Jestliže nulový nebo střední bod neexistuje, může se přes velkou impedanci uzemnit vodič vedení. [13]

V případě jedné poruchy mezi živou a neživou částí nebo živou částí a zemí je pak poruchový proud malý a automatické odpojení se za splnění těchto podmínek nevyžaduje. Musí však být provedena opatření, aby se zabránilo nebezpečí škodlivých patofyziologických účinků na osobu, která se dotýká současně přístupných neživých částí v případě, kdy dojde ke dvěma poruchám současně. [13]

Aby se omezila přepětí nebo utlumila napěťová oscilace, může se vyžadovat uzemnění přes impedance nebo umělé středy; jejich charakteristiky musí odpovídat požadavkům instalace.

Neživé části musí být uzemněny jednotlivě, po skupinách nebo společně. [13]

Musí být splněny tyto podmínky:

$$\text{-Ve střídavých sítích:} \quad R_A \times I_d \leq 50 \text{ V} \quad [\Omega, \text{A}] \quad (2.1)$$

$$\text{-V stejnosměrných sítích:} \quad R_A \times I_d \leq 120 \text{ V} \quad [\Omega, \text{A}] \quad (2.2)$$

Kde:

$R_A$  součet odporu zemniče a ochranného vodiče k neživým částem;

$I_d$  poruchový proud při první poruše o zanedbatelné impedanci mezi fázovým vodičem a neživou částí. Hodnota  $I_d$  bere v úvahu unikající (svodové) proudy a celkovou impedanci uzemnění elektrické instalace. [13]

V sítích IT mohou být pro monitorování, hlídání a ochranu použity následující přístroje: [13]

- hlídače izolačního stavu;
- přístroje pro monitorování reziduálního proudu;
- systémy pro vyhledávání izolačních poruch;
- nadproudové ochranné přístroje;
- proudové chrániče.

Jestliže je použit proudový chránič, nemůže být jeho vybavení při první poruše v důsledku kapacitních unikajících proudů vyloučeno. [13]

V případech kdy je síť IT použita z důvodu zajištění kontinuity napájení, musí být hlídač použit izolačního stavu, aby signalizoval výskyt první poruchy mezi živou a neživými částmi a zemí. Tento přístroj musí spustit zvukový a/nebo vizuální signál, který musí trvat, dokud porucha trvá. Doporučuje se, aby první porucha byla odstraněna v co nejkratší době. [13]

V rozsáhlých objektech, jako jsou výškové budovy, není přímé spojení ochranných vodičů se zemnicem z praktických důvodů možné. Uzemnění neživých částí lze dosáhnout vzájemným pospojováním ochranných vodičů, neživých částí a cizích vodivých částí. [13]

Přístroj, který hlídá stav izolace, může být nutný i z jiných důvodů, než je ochrana před nebezpečným dotykem neživých částí. Nastane-li po první poruše porucha druhá, musí být pro odpojení od zdroje v případě druhé poruchy splněny dále uvedené podmínky:

- a) Jestliže jsou neživé části propojeny ochranným vodičem a společně uzemněny ke stejné uzemňovací soustavě, platí podmínky podobné jako pro síť TN a tyto podobné podmínky musí být splněny, jestliže nulový bod v případě střídavých sítí nebo střední bod v případě stejnosměrných sítí není vyveden. [13]

- jestliže střední vodič není vyveden:  $2I_a Z_s \leq U$  [A, Ω, V] (2.3)

- nebo je-li střední vodič vyveden:  $2I_a Z'_s \leq U_0$  [A, Ω, V] (2.4)

Kde: [13]

$U_0$  jmenovité střídavé napětí (efektivní hodnota) mezi fází a středním vodičem;

$U$  jmenovité střídavé napětí (efektivní hodnota) mezi fázemi;

$Z_s$  impedance poruchové smyčky složené z fázového vodiče a ochranného vodiče obvodu;

$Z'_s$  impedance poruchové smyčky složené ze středního vodiče a ochranného vodiče obvodu;

$I_a$  vypínací proud ochranného prvku odpojovacího v době  $t$  stanovené v tabulce 1, pokud ji lze uplatnit, nebo do 5s pro všechny ostatní obvody, pro které se tato doba povoluje.

- b) Jestliže jsou neživé části uzemněny po skupinách nebo jednotlivě platí tato podmínka

$$R_A \times I_a \leq 50 \text{ V} \quad [\Omega, \text{A}, \text{V}] \quad (2.5)$$

Kde:

$R_A$  součet odporu zemniče a ochranného vodiče k neživým částem;

$I_a$  proud vyvolávající automatickou funkci odpojovacího přístroje v době odpovídající tab.: 1

Pro usnadnění výpočtu rezistencí a reaktancí ochranného vodiče jednotlivých obvodů se doporučuje, aby ochranný vodič byl vytvořen pomocí čtvrtého vodiče, jestliže střední vodič není vyveden, nebo pátého vodiče, jestliže střední vodič je vyveden izolovaně, ležícího v těsné blízkosti fázových vodičů (např. v kabelu).

Tabulka 1: *Jmenovitá napětí a maximální doby odpojení v sítích IT při druhé poruše:*

Jmenovité napětí instalace $U_0/U$ [V]	Odpojovací doba [s]	
	Střední vodič není vyveden	střední vodič je vyveden
230/400V	0,4	0,8
400/690V	0,2	0,4
580/1000V	0,1	0,2

Pro použití hlídačů izolačního stavu platí:

Izolační odpor sítě proti zemi včetně spotřebičů se trvale kontroluje. Klesne-li celkový izolační odpor sítě i s připojenými spotřebiči pod  $1000\Omega$  při odporu uzemnění  $20\Omega$  nebo pod  $200\Omega$  při odporu uzemnění  $2\Omega$ , se zařízení odpojuje s výjimkou těch zařízení, kde je ještě jiným způsobem zajištěno, že nevznikne nebezpečné dotykové napětí, jako např. provedením ochrany pospojováním.

Zařízení, kde by odpojením vznikly velké hospodářské škody apod., nemusí být odpojeno, ale musí být neprodleně zahájeny práce na odstranění závady.[13]

S ohledem na trvalou kontrolu izolačního stavu sítě se vznik dvoupólového zemního spojení neuvažuje.

Požadavek na odpojení podle a) se považuje také za splněný, zajistí-li se při vzniku dvoupólového spojení odpojení alespoň jedné izolačně vadné části.

## 2.3 Hlídač izolačního stavu

Pro kontrolu izolačního stavu byl vybrán přístroj od firmy BENDER A-ISOMETER IRDH275.



Obr. 17: Hlídač izolačního stavu a externí jednotka

Tento hlídač izolačního stavu, byl vybrán s ohledem na předešlé dobré zkušenosti a jednoduchou obsluhu. Nevýhodou má v omezeném vstupním napětí, které je maximálně 793V AC, případně 650V DC. Tento nedostatek lze vyřešit použitím externí jednotky AGH150W-4, díky které lze monitorovat napětí až 1150V AC, či 1760V DC. Tento hlídač izolačního stavu má dva reléové výstupy pro varování a alarm s nastavitelnou hodnotou izolačního odporu  $1k\Omega$ - $10M\Omega$ . Je vybaven proudovým výstupem 4-20mA, který je přiveden do řídicího systému, stejně jako výstupy varování a alarmu. Pro servisní účely je zde funkce bypass, kterou lze vypnout měření při diagnostice jinými metodami, které by mohly způsobit falešný poplach.

### 3 Uzemnění, ochranné vodiče a vodiče ochranného pospojování v sítích IT

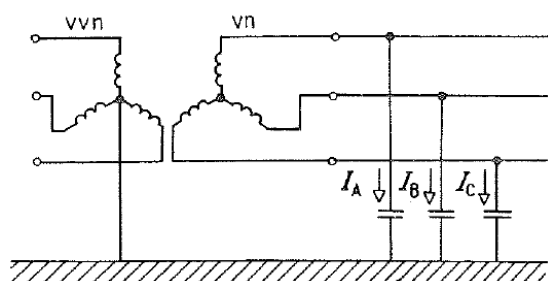
#### 3.1 Uzemnění

Jeden z nejdůležitějších požadavků na provedení a provoz silnoproudých a rozvodných zařízení je požadavek bezpečnosti osob i věcí, které přicházejí do styku s jednotlivými částmi elektrického rozvodu. K zajištění bezpečnosti slouží je důležité dobré uzemnění některých částí rozvodu.

Uzemněním nazýváme vodivé spojení uzlu alternátoru či transformátoru nebo vodivých předmětů v blízkosti elektrického obvodu se zemí. Části uzemnění, které jsou uloženy v zemi a zajišťují vodivé spojení se zemí, se nazývají zemní elektrody neboli zemniče. Vodivé spojení mezi zemničem a místem, které se uzemňuje, nazýváme zemní svod. Přechod mezi zemničem a zemí charakterizuje zemní odpor, což je poměr napětí zemniče (vzhledem k potenciálu země v dostatečné vzdálenosti od zemniče) k proudu odcházejícímu do země, neboli k zemnímu proudu. Soubor všech vodivě spojených zemničů včetně jejich zemních svodů nazýváme zemnicí soustavou.

#### 3.2 Zemní spojení

V sítích provozovaných s přímo uzemněným uzlem bylo vodivé spojení jedné fáze se zemí nazýváno jednofázový zkrat. V sítích provozovaných s izolovaným uzlem, popř. v sítích kompenzovaných (tj. v sítích, jejichž uzel je spojen se zemí přes zhášecí tlumivky nebo u nichž je vytvořen umělý nulový bod pomocí zhášecích transformátorů) nazýváme vodivé spojení jedné fáze se zemí, zemní spojení. Zásadní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je v tom, že zkratový proud je většinou několikanásobně větší, než proud provozní (nebo je blízký provoznímu proudu) a má indukční charakter, kdežto v místě zemního spojení prochází pouze malý



proud kapacitního charakteru. Další zvláštností tohoto proudu je, že nezávisí na vzdálenosti od zdroje (je přibližně stejný ve všech místech sítě). [11]

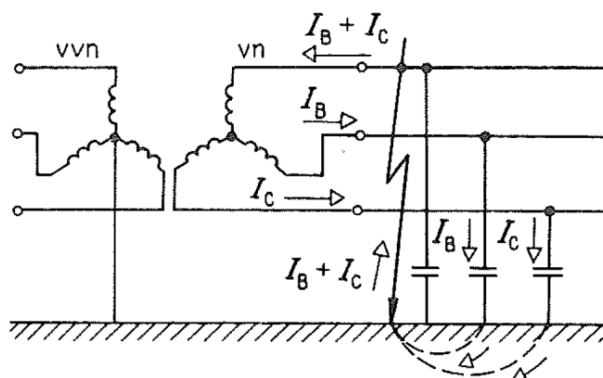
V izolovaných sítích v ustáleném provozním stavu procházejí kapacitami k zemi kapacitní proudy, jejichž součet při symetrické síti a symetrickém napětí je roven nule (viz obr. 18)

Obr. 18: Schematické znázornění sítě s izolovanou nulou[11]



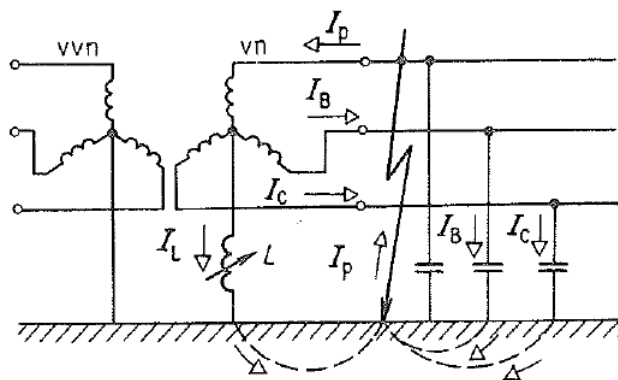
V případě, že dojde v takové síti ke spojení některé fáze se zemí, uzavírají se kapacitní proudy zdravých fází přes zem, zemní spojení a vinutí transformátoru. Zemi procházejí proudy, které při rozsáhlejší síti mohou dosahovat značných velikostí (obr. 19). [11]

Pokud poruchový proud nepřekročí stanovenou hodnotu, může být síť s izolovaným uzlem ponechána v provozu. Komplikace nastávají při zemním spojení, při němž elektrický oblouk hoří nestabilně, tj. dochází k jeho hasnutí a opětovnému zapalování (vznikne tzv. přerušované zemní spojení).



Obr. 19: Schematické znázornění sítě s izolovanou nulou při zemním spojení[11]

V těchto případech totiž může být přerušované zemní spojení zdrojem nebezpečných přepětí v síti. Účinným prostředkem pro potlačení oblouku v místě zemního spojení je uzemnění nuly transformátoru přes tlumivku, jejíž indukčnost se dá nastavit tak, aby indukční proud jdoucí od ní k místu zemního spojení zde kompenzoval kapacitní proudy zdravých fází a aby tak došlo k uhašení oblouku (obr. 20). [11, str. 141]



Obr. 20: Schématické znázornění vlivu zhášecí tlumivky[11]

### 3.3 Uzemnění na lodích

Uzemnění na lodích by se dalo spíše charakterizovat ochranným pospojováním všech neživých kovových částí mezi sebou a kostrou lodi samotné. Může tomu být jak pomocí samostatných kabelů či pomocí ochranných vodičů v kabelových svazcích. Tímto zajistíme, že všechny kovové části budou na stejném potenciálu. Tímto zajistíme i ochranu před úderem blesku, jelikož samotný kovový trup lodi je spojen s potenciálem vody.

### 3.3.1 Vodiče ochranného pospojování:

Dle [16] musí mít všechny měděné vodiče ochranného pospojování dostatečný průřez, aby v případě poruchy pokud možno neteklo tímto vodičem více než  $150\text{A/mm}^2$ . Minimální průřez ochranných vodičů dle [16] je v následující tabulce:

Tabulka 2: *Průřezy vodiče ochranného pospojování*

Uspořádání zemního vodiče		Průřez $Q$ vztažený k jedné fázi proudovodného vodiče [ $\text{mm}^2$ ]	Minimální průřez zemního vodiče
1	Izolovaný vodič v pevném uložení Splétaná lícna, Oddělený izolovaný vodič v suchém a pevném uložení	$Q \leq 16$	$Q$
		$16 < Q$	50% proudovodného vodiče ale ne méně než $16\text{mm}^2$
2	Neizolovaný ochranný vodič pro pevné uložení, k propojení stínění, pancíře či k propojení kovových částí mezi sebou	$Q \leq 2,5$	$1\text{mm}^2$
		$2,5 < Q \leq 6$	$1,5\text{mm}^2$
		$6 < Q$	Není dovoleno
3	Oddělený ochranný vodič instalovaný v pevném uložení rozdílný od uspořádání č. 1	$Q < 2,5$	Stejný průřez, minimálně $1,5\text{mm}^2$
		$2,5 < Q \leq 120$	50% proudovodného vodiče ale ne méně než $4\text{mm}^2$
		$120 < Q$	$70\text{mm}^2$
4	Izolovaný ochranný pohyblivý vodič	$Q \leq 16$	Stejný průřez jako proudovodný vodič
		$16 < Q$	50% proudovodného vodiče ale ne méně než $16\text{mm}^2$

Příklad:

Pokud budeme navrhovat oddělený ochranný vodič dle kategorie 3, kdy pracovní vodič fáze je o průřezu  $6\text{mm}^2$ , tak průřez vodiče PE, by měl být 50% průřezu pracovního, tedy minimálně  $3\text{mm}^2$ , ovšem, platí druhá podmínka, kdy minimální průřez tohoto vodiče musí být  $4\text{mm}^2$ , tedy musíme využít vodič PE alespoň o tomto průřezu.

## 4 Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909-0 a IEC 61363-1

### 4.1 Zkraty

Vedle normálních provozních stavů musíme u každého elektrického zařízení počítat také s poruchovými jevy, jako např. nedovolené přetížení, přepětí nebo zkrat. Nelze jim zcela zabránit ani v případě, že zařízení je projektováno, realizováno, zkoušeno a provozováno podle odpovídajících platných předpisů a norem. Je tedy nutné zajistit vhodným řešením elektrického zařízení, aby v případě výskytu poruchových jevů se jejich možné následky minimalizovaly a nebyly pro své okolí nebezpečné.

Nejrozšířenějšími a nejvážnějšími poruchami v elektrizační soustavě jsou zkraty. Zkrat je přechodný elektrický jev a vzniká vzájemným spojením fází nebo fáze se zemí v soustavě s uzemněným uzlem. Tím dochází ke vzniku nežádoucích zkratových proudů, které musí být bezprostředně po vzniku samočinně odpojeny ochranou.

Při zkratu se celková impedance zkratem postižené části sítě zmenšuje, zvětšují se proudy, tak jak vyplývá z Ohmova zákona. To vede ke snížení napětí v místech blízkých zkratu. Obvykle v místě zkratu vznikají přechodné odpory vzniklého oblouku a ostatních částí cesty poruchového proudu. Přesné určení velikosti těchto odporů, zvláště odporu oblouku, je velmi obtížné. Proud i délka oblouku se v průběhu zkratu mění, mění se tedy také odpor oblouku. Při výpočtu zkratových proudů pro účely dimenzování elektrických zařízení zanedbáváme [2]

#### 4.1.1 Průběh zkratového proudu

Při každém zkratu, bez ohledu na jeho příčinu, se jedná o přechod z normálního stavu na stav poruchový, tj. přechod z normálního proudu na ustálený zkratový proud. Tento přechod se neděje skokem v jediném okamžiku, ale je doprovázen přechodným dějem, který trvá určitou dobu. Výsledný zkratový proud se skládá ze dvou hlavních složek: [2]

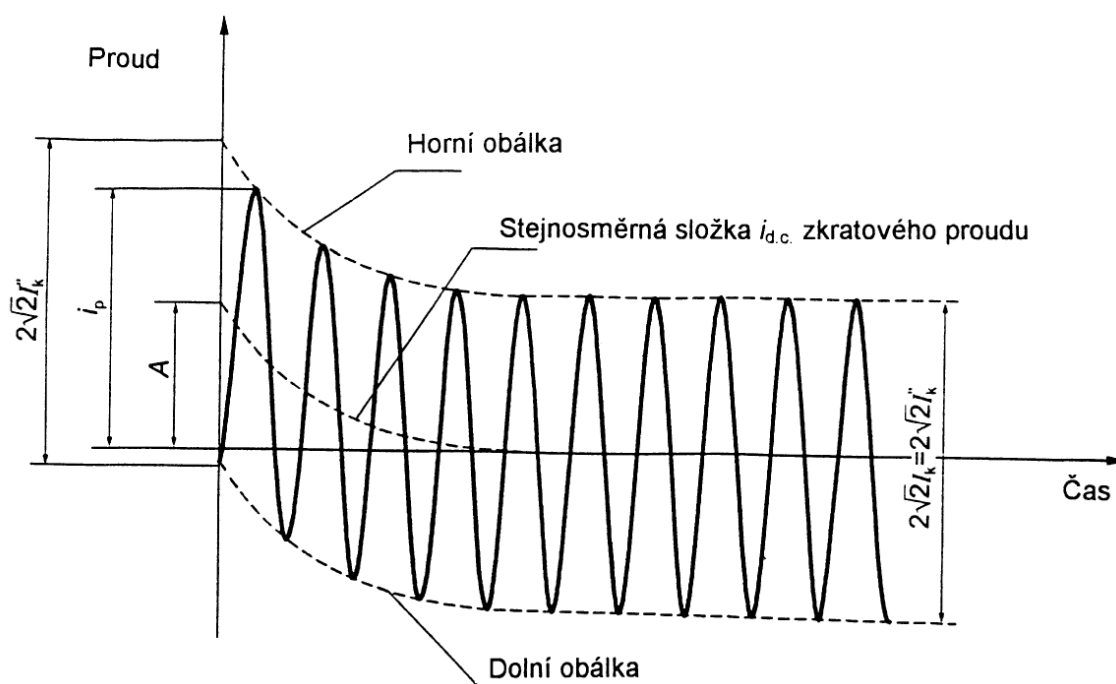
##### Stejnoseměrná složka

Velikost stejnosměrné složky závisí na okamžiku, ve kterém došlo ke zkratu. Zkratový proud je především indukčního charakteru, takže je za napětím opožděn až o  $90^\circ$ . Stejnoseměrná složka je maximální v okamžiku, kdy je okamžitá hodnota napětí v okamžiku zkratu nejmenší. V případě trojfázového zkratu jsou stejnosměrné složky v jednotlivých fázích různé, díky posunutí fázových

napětí o  $120^\circ$ . Maximální stejnosměrná složka může být jen v jedné fázi. Stejnosměrná složka ovlivňuje velikost nárazového zkratového proudu  $i_p$ . [2]

### Střídavá složka

Střídavá složka má stejnou frekvenci jako je frekvence sítě, může být konstantní jako na obr. 21. nebo může v případě elektrický blízkého zkratu mít klesající charakter. Průběh proudu je stejný jako zkratový proud ve fázi, kde nevzniká stejnosměrná složka. [2]



Obr. 21: Průběh zkratového proudu s konstantní střídavou složkou [1]

Kde:

- $I_k''$  počáteční souměrný rázový zkratový proud,
- $i_p$  nárazový zkratový proud,
- $I_k$  ustálený zkratový proud,
- $i_{d.c.}$  stejnosměrná složka zkratového proudu,
- $A$  počáteční hodnota stejnosměrné složky  $i_{d.c.}$

## 4.2 Metodika dle ČSN EN 60909-0

### 4.2.1 Rozsah platnosti

Tato norma platí pro výpočty zkratových proudů v trojfázových soustavách 50/60Hz napětových hladin NN, VN, VVN a ZVN až do 550kV. Tato metoda platí pro případ souměrných i nesouměrných zkratů. Jednoduché zemní spojení, vyskytující se v sítích s neuzemněným středem tato norma neuvažuje.

Tato norma také nezahrnuje výpočty zkratových proudů v instalacích na lodích a v letadlech.

### 4.2.2 Definice [1]

**Zkrat:** náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.

**Zkratový proud:** nadproud v důsledku zkratu v elektrické soustavě.

**Předpokládaný zkratový proud:** proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí beze změny napájení.

**Souměrný zkratový proud:** efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou eventuální aperiodickou složkou proudu.

**Počáteční souměrný rázový zkratový proud  $I_K''$ :** efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

**Počáteční souměrný rázový zkratový výkon  $S_K''$ :** pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu  $I_K''$ , jmenovitého napětí sítě  $U_n$ , a součinitele  $\sqrt{3}$  : Pak tedy  $S_K'' = \sqrt{3}U_n I_K''$ .

**Stejnosměrná (aperiodická) složka  $i_{dc}$  zkratového proudu:** střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

**Nárazový zkratový proud  $i_p$ :** maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

**Souměrný zkratový vypínací proud  $I_b$ :** efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

**Ustálený zkratový proud  $I_k$ :** efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu

**Záběrový proud  $I_{LR}$ :** největší souměrný efektivní proud asynchronního motoru se zabrzděným rotorem, který je napájen jmenovitým napětím  $U_{rM}$  při jmenovitém kmitočtu

**Ekvivalentní oteplovací zkratový proud  $I_{th}$**  : efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění

**Jmenovité napětí sítě  $U_n$** : sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

**Napětí ekvivalentního zdroje  $cU_n/\sqrt{3}$**  : napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu. Jedná se o jediné aktivní napětí sítě.

**Napětíový součinitel  $c$** : poměr mezi napětím ekvivalentního napětíového zdroje a jmenovitým napětím sítě  $U_n$  děleným  $\sqrt{3}$ . Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

**Elektricky vzdálený zkrat**: zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.

**Elektricky blízký zkrat**: zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu  $I_K''$  bez motorů.

**Rázová reaktance  $X_d''$  synchronního stroje**: reaktance uplatňující se v okamžiku zkratu; pro výpočet zkratových proudů se používá nasycená hodnota  $X_d''$ . Jestliže reaktanci  $X_d''$  dělíme jmenovitou impedancí  $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$  dostaneme výsledek v poměrných jednotkách, který se označuje malým písmenem  $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$ .

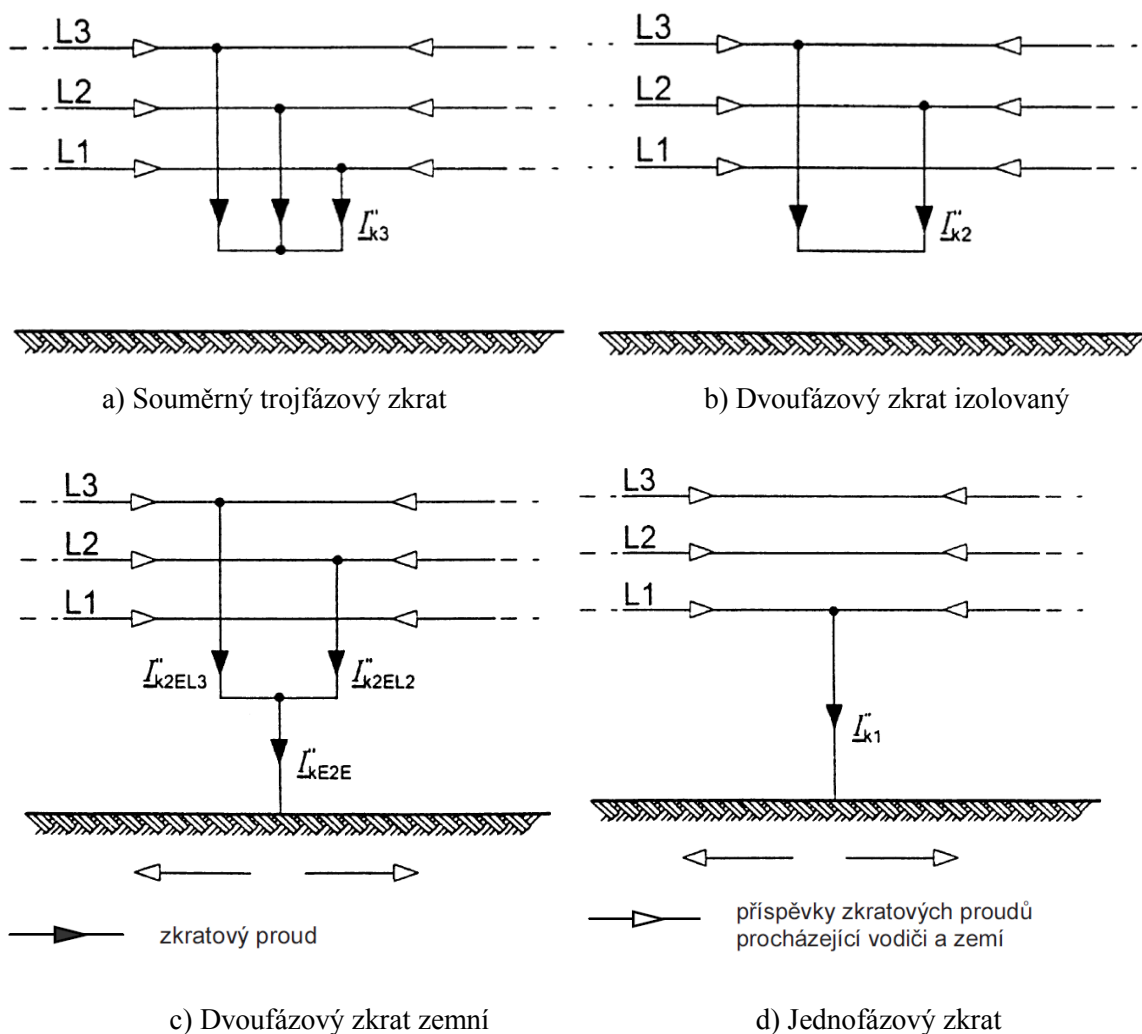
**Doba trvání zkratu  $t_k$** - doba od okamžiku vzniku zkratu až do jeho konečného okamžitého vypnutí ve všech fázích postižených zkratem.

#### 4.2.3 Předpoklady výpočtu [1]

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým apod.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze.
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány

## 4.2.4 Druhy zkratů



Obr. 22: Charakteristiky zkratů a jejich proudů[1]

**Souměrné zkraty:**

Mezi souměrné zkraty řadíme pouze trojpólový zkrat (obr.22a), který může nastat při kovovém spojení všech fází navzájem. Ve všech postižených vodičích teče stejný zkratový proud. Trojpólový zkrat se nejčastěji vyskytuje v kabelových sítích, kde se při jakémkoliv zkratu, vlivem oblouku, poruší izolace mezi fázemi a vede často k nejvyšším hodnotám předpokládaného zkratového proudu.

**Nesouměrné zkraty:**

Na rozdíl od trojpólového souměrného zkratu, který působí na trojfázovou soustavu symetricky, jsou všechny ostatní zkraty příčinou nesymetrického zatížení a mluvíme o nesouměrných zkratech. Patří k nim:- dvofázový zkrat izolovaný (obr. 22b). Vzniká při spojení dvou různých fází. - jednofázový zkrat (obr.22d). Vzniká při spojení fáze se zemí u soustavy s přímo uzemněným uzlem – dvofázový zkrat zemní (obr.22c). Vzniká při spojení dvou různých fází a země.

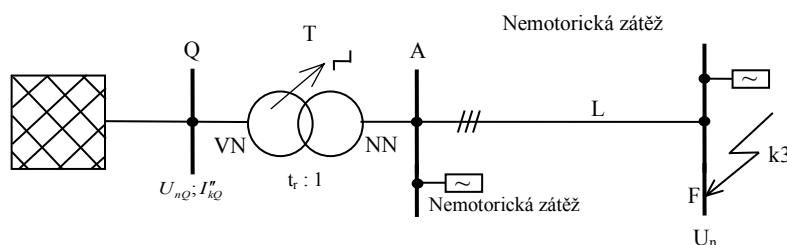
#### 4.2.5 Metody výpočtu – Metoda napět'ového zdroje v místě zkratu

V této výpočtové metodě je v místě zkratu F, zaveden ekvivalentní napět'ový zdroj. Tento zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny svou vnitřní impedancí.

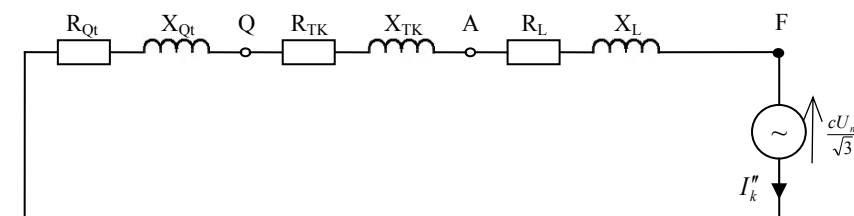
Ve všech případech se k určení zkratového proudu v tomto místě zkratu použije tento ekvivalentní napět'ový zdroj. Údaje o odběrech, poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů atd., nejsou pro výpočet důležité a je možné je vynechat.

Obr. 23 znázorňuje příklad ekvivalentního napět'ového zdroje v místě zkratu F, jakožto jediného aktivního zdroje napětí soustavy napájené transformátorem bez nebo s přepínačem odboček. Všechna další aktivní napětí v soustavě jsou nulová. Nadřazená soustava podle obrázku 24 je respektována pouze její vlastní vnitřní impedancí  $Z_{Qt}$ , přepočtenou na stranu nižšího napětí transformátoru a transformátorem pomocí své impedance vztažené na stranu nižšího napětí. Paralelní admitanci, např. kapacita vedení a pasivní zátěže, není nutno při výpočtu proudů obvodu na obrázku 24 uvažovat. [1]

Napět'ový součinitel  $c$  stanovujeme podle tabulky 3, předpokládáme přitom, že se nejvyšší napětí v běžném systému bez poruchy nebude od jmenovitého napětí lišit v průměru více než +5 % (na straně nižšího napětí) nebo o +10 % (na straně vyššího napětí) od jmenovitého napětí systému  $U_n$ . [1]



Obr. 23: Schéma soustavy[1]



Obr. 24: Náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy[1]



Tabulka 3: *Napěťový součinitel c*

Jmenovité napětí	$c_{max}$	$c_{min}$
NN 100 V až 1000V	1,05 - 1,10	0,95
VN > 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
VVN > 35 kV		

#### 4.2.6 Metody výpočtu - Metoda souměrných složek [1]

Výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládá se přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, např. v případě transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu zkratových proudů mají stejnou přesnost také i v případě netransponovaných venkovních vedení. Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- Proud sousledné složkové soustavy  $\underline{I}_{(1)}$ ;
- Proud zpětné složkové soustavy  $\underline{I}_{(2)}$ ;
- Proud netočivé složkové soustavy  $\underline{I}_{(0)}$ .

Budeme-li fázi L1 považovat za referenční, potom jsou proudy  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  a  $I_{L3}$ :

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad [\text{A}] \quad (4.1)$$

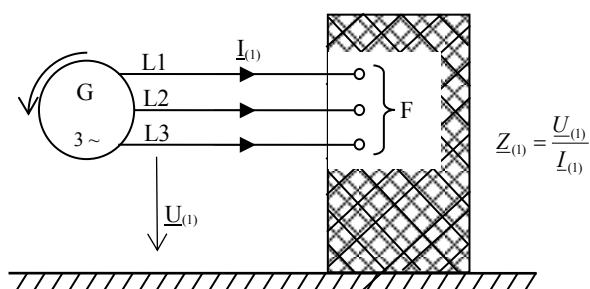
$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad [\text{A}, -] \quad (4.2)$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad [\text{A}, -] \quad (4.3)$$

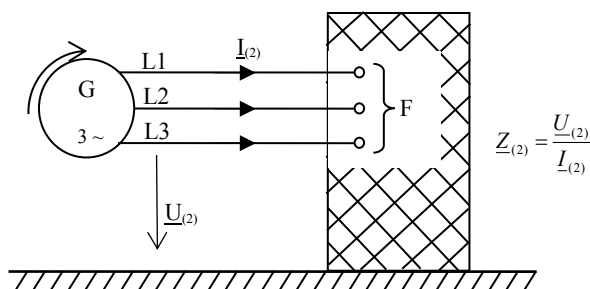
$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad [-] \quad (4.4)$$

$$\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad [-] \quad (4.5)$$

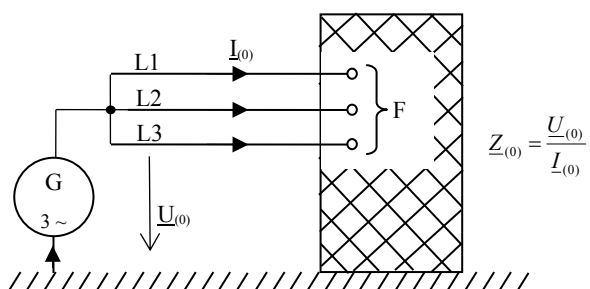
Zkratové impedance trojfázového střídavého systému v místě zkratu:



Obr. 25: Sousedná složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(1)}$  [1]



Obr. 26: Zpětná složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(2)}$  [1]



Obr. 27: Netočivá složka zkratové impedance  $\underline{Z}_{(0)}$  [1]

Každá z těchto tří souměrných složek soustavy má svoji vlastní impedanci.

**Sousednou zkratovou impedanci  $\underline{Z}_{(1)}$**  v místě zkratu F určíme tak, že souměrnou soustavu napětí sousledné složky v kladném pořadí fází přiložíme do místa zkratu F, všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.

**Zpětnou zkratovou impedanci  $\underline{Z}_{(2)}$**  v místě zkratu určíme tak, že souměrnou soustavu napětí zpětné složky v záporném pořadí fází přiložíme do místa zkratu F.

**Netočivou zkratovou impedanci  $\underline{Z}_{(0)}$**  v místě zkratu F určíme tak, že přiložíme střídavé napětí mezi tři zkratované fáze a společné zpětné vedení (například zemnicí soustava, nulový vodič, zemnicí vodič, stínění či plášť kabelu).

Kapacity vedení (venkovních vedení a kabelů) v soustavách nízkého napětí se mohou pro sousledné, zpětné a netočivé soustavy zanedbat.

Zanedbání netočivé složky kapacit vedení v soustavách s uzemněným uzlem vede k výsledkům, které jsou mírně vyšší než skutečné hodnoty zkratových proudů. Velikost odchylky závisí na konfiguraci sítě.

#### 4.2.7 Maximální zkratové proudy[1]

Výpočet maximálního zkratového proudu provádíme pro dimenzování zařízení vůči tepelným a mechanickým účinkům zkratových proudů.

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel  $c_{\max}$  dle tabulky 3;
- Vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu;
- Pokud je použita ekvivalentní impedance  $Z_Q$  jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů;
- Motory vysokého napětí musí být zahrnuty do výpočtu maximálního zkratového proudu. Motory nízkého napětí musí být zahrnuty do výpočtu, pokud jejich příspěvek k počátečnímu zkratovému proudu je vyšší než 5%;
- Uvažují se rezistence vedení  $R_L$  při teplotě 20°C.

#### 4.2.8 Minimální zkratové proudy[1]

Výpočet minimálních zkratových proudů provádíme pro volbu pojistek, nastavení ochran a kontrolu rozběhu motorů

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel  $c_{\min}$  dle tabulky 3;
- Vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu;
- Motory musí být zanedbány;
- Rezistence vedení  $R_L$  musí být uvažována při nejvyšší teplotě:

$$R_L = [1 + \alpha(\theta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \quad [\Omega, ^\circ\text{C}, -] \quad (4.6)$$

Kde:

$R_{L20}$  rezistence při teplotě 20°C;

$\theta_e$  teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu;

$\alpha$  součinitel rovný 0,004/K platný s dostatečnou přesností pro praktické účely pro měď, hliník a slitinu hliníku.

#### 4.2.9 Zkratová impedance elektrických zařízení[1]

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobných zařízení si jsou zpětná a sousledná zkratová impedance rovny  $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ .

Při výpočtu netočivé zkratové impedance vedení se  $Z_{(0)}$  určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením reprezentovaným např. zemí, nulovým vodičem, kabelovým pláštěm. V tom případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Netočivé zkratové impedance se za normálních okolností liší od sousledných zkratových impedancí.

##### Síťové napáječe[1]

Je-li trojfázový zkrat napájen přímo ze sítě, u které známe pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud  $I''_{kQ}$  nebo počáteční souměrný rázový zkratový výkon  $S''_{kQ}$  v bodě připojení napáječe, pak ekvivalentní impedance sítě  $Z_Q$  (sousledná zkratová impedance) se v bodě připojení napáječe Q určuje:

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} = \frac{cU_{kQ}^2}{S''_{kQ}} \quad [\Omega, ^\circ\text{C}, -] \quad (4.7)$$

Je-li zkrat apájen přes transformátor pak lze ekvivalentní impedanci  $Z_{Qt}$  vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím určit jako:

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{kQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad [\Omega, \text{A}, \text{V}, \text{VA}, -] \quad (4.8)$$

$U_{nQ}$  jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q;

$I''_{kQ}$  počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení Q;

$S''_{kQ}$  počáteční souměrný rázový zkratový výkon v bodě připojení Q;

$c$  napěťový součinitel (viz tabulka 3) pro napětí  $U_{nQ}$ ;

$t_r$  jmenovitý převod transformátoru, kdy je přepínač odboček v základní poloze.

**Dvouvinut'ové transformátory[1]**

Sousledné zkratové impedance dvouvinut'ových transformátorů  $Z_T = R_T + jX_T$  je možné vypočítat ze jmenovitých údajů transformátoru dle vztahů:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad [\Omega, V, VA] \quad (4.9)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad [\Omega, V, A, VA] \quad (4.10)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad [\Omega,] \quad (4.11)$$

Kde:

$U_{rT}$  jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

$I_{rT}$  jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

$S_{rT}$  jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru;

$P_{krT}$  jmenovité ztráty nakrátko transformátoru;

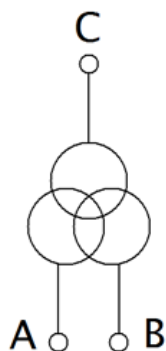
$u_{kr}$  jmenovité napětí nakrátko v procentech;

$u_{Rr}$  činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech.

Činnou složku impedance lze vypočítat ze jmenovitých ztrát transformátoru nakrátko. Poměr  $R_T/X_T$  obvykle roste s velikostí transformátoru. U velkých transformátorů je odpor tak malý, že je možné při výpočtu velikosti zkratového proudu předpokládat, že impedanci představuje pouze reaktance. Odpor je nutné brát v úvahu pouze tehdy, jestliže se má vypočítat nárazový zkratový proud  $i_p$  nebo stejnosměrná složka  $i_{DC}$ .

**Trojvinut'ové transformátory[1]**

V případě trojvinut'ových transformátorů lze sousledné zkratové impedance  $Z_A$ ,  $Z_B$  a  $Z_C$  vypočítat pomocí tří zkratových impedancí (vztahených na stranu A transformátoru):



Obr. 28: Trojvinut'ový transformátor

$$Z_{AB} = \frac{u_{krAB}}{100} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad [\Omega] \quad (4.12)$$

$$Z_{AC} = \frac{u_{krAC}}{100} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad [\Omega] \quad (4.13)$$

$$Z_{BC} = \frac{u_{krBC}}{100} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad [\Omega] \quad (4.14)$$

Pomocí vzorců:

$$\underline{Z}_A = \frac{(\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC})}{2} \quad [\Omega] \quad (4.15)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{(\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC})}{2} \quad [\Omega] \quad (4.16)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{(\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB})}{2} \quad [\Omega] \quad (4.17)$$

Kde:

$U_{rTA}$  jmenovité napětí na straně A;

$S_{rTAB}$  jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B;

$S_{rTAC}$  jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C;

$S_{rTBC}$  jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C;

$u_{krAB}$  jmenovité napětí nakrátko v %, mezi stranami A a B;

$u_{krAC}$  jmenovité napětí nakrátko v %, mezi stranami A a C;

$u_{krBC}$  jmenovité napětí nakrátko v %, mezi stranami B a C.

### Vedení [1]

Souslednou zkratovou impedanci  $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$  lze vypočítat z parametrů vodiče, jako jsou průřezy a rozteče vodičů.

Netočivé zkratové impedance lze určit měřením nebo výpočtem pomocí poměrů  $R_{(0)L} / R_L$  a  $X_{(0)L} / X_L$ .

Impedance  $\underline{Z}_{(1)L}$  a  $\underline{Z}_{(0)L}$  kabelů nízkého a vysokého napětí závisí na pracovních postupech a normách jednotlivých států a lze je převzít z jednotlivých příruček nebo údajů výrobce.

**Reaktory omezující zkratový proud [1]**

Reaktory omezují zkratový proud a považují se za součást zkratové impedance. Sousedné, zpětné a netočivé zkratové impedance jsou si rovny za předpokladu geometrické souměrnosti.

$$Z_T = \frac{u_{kR}}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{rR}} \quad \text{a} \quad R_R \ll X_R \quad [\Omega, V, A] \quad (4.18)$$

Kde:

$U_n$  jmenovité napětí soustavy;

$u_{kR}$  impedanční napětí reaktoru

$I_{rR}$  jmenovitý proud reaktoru

**Synchronní stroje [1]**

Při výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátorů, je třeba použít v sousledné složkové soustavě následující impedanci:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad [\Omega, -] \quad (4.19)$$

Při použití ekvivalentního napětového zdroje  $cU_n / \sqrt{3}$  je zaveden korekční součinitel  $K_G$  pro výpočet korigované impedance  $\underline{Z}_{rG}$ .

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad [V, \Omega, -] \quad (4.20)$$

Kde:

$\underline{Z}_{rG}$  korigovaná impedance generátoru;

$\underline{Z}_G$  rázová impedance generátoru v sousledné soustavě  $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$ ;

$U_n$  jmenovité napětí soustavy;

$U_{rG}$  jmenovité napětí generátoru;

$c_{\max}$  napětový součinitel podle tabulky 3;

$\varphi_{rG}$  fázový úhel mezi  $I_{rG}$  a  $U_{rG} / \sqrt{3}$ ;

$x_d''$  poměrná rázová reaktance generátoru vztažena k jmenovité impedanci.

Pro fiktivní rezistence  $R_{Gf}$  lze s dostatečnou přesností použít tyto hodnoty:

$$R_{Gf} = 0,05 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA,}$$

$$R_{Gf} = 0,07 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA,}$$

$$R_{Gf} = 0,15 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} \leq 1 \text{ 000 V}$$

U synchronních kompenzátorů a motorů počítáme zkratové impedance stejným způsobem jako u generátorů.

### Asynchronní motory [1]

Příspěvek asynchronních motorů v nízkonapěťové soustavě ke zkratovému proudu  $I''_{kM}$  se může zanedbat, jestliže tento příspěvek není větší než 5% počátečního zkratového proudu, vypočteného bez příspěvku těchto motorů.

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I''_{kM} \quad [I] \quad (4.21)$$

Kde :

$\sum I_{rM}$  součet jmenovitých proudů motorů připojených přímo k síti, kde se vyskytl zkrat;

$I''_{kM}$  počáteční souměrný rázový zkratový proud bez vlivu motorů.

V případě trojfázových souměrných zkratů příspěvky asynchronních motorů ke zkratovému proudu rychle zanikají.

Motory vysokého a nízkého napětí, které jsou k síti, v níž dochází ke zkratu, připojeny přes dvouvinutové transformátory, lze při výpočtu zkratového proudu zanedbat jestliže platí:

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c100 \sum S_{rT}}{\sqrt{3} U_{nQ} I''_{kQ}} - 0,3 \right|} \quad [VA, W, A, V, -] \quad (4.22)$$

Kde

$\sum P_{rM}$  je součet jmenovitých činných výkonů uvažovaných motorů vysokého a nízkého napětí;

$\sum S_{rT}$  součet jednotlivých zdánlivých výkonů všech transformátorů, přes které jsou přímo napájeny motory;

$I''_{kQ}$  počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q bez příspěvku motorů;

$U_{nQ}$  jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q.

### Statické měniče [1]



Pohony napájené ze statického měniče, např. pohony válcovacích stolic, se počítají pouze v případě trojfázových zkratů, pokud setrvačné hmoty motorů a statické měniče zajišťují zpětný přenos energie při brzdění (rekuperaci) v době zkratu. Přitom přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu  $I_k''$  a nárazovému zkratovému proudu  $i_p$ . K souměrnému vypínacímu zkratovému proudu  $I_b$  a ustálenému zkratovému proudu  $I_k$  statické měniče nepřispívají. V důsledku toho jsou statické měniče zahrnuty do výpočtu zkratových proudů stejným způsobem jako asynchronní motory.

### Kondenzátory a nemotorické zátěže [1]

Při výpočtu nárazových zkratových proudů bez ohledu na čas vzniku zkratu může být zanedbán vybíjecí proud paralelních kondenzátorů. Lze také zanedbat účinek sériových kondenzátorů, jestliže jsou vybaveny paralelními zařízeními na omezení napětí, působícím při výskytu zkratu. Kapacity vedení, paralelní admitance a netočivé zátěže mohou být zanedbány.

#### 4.2.10 výpočet zkratových proudů [1]

Počáteční rázový zkratový proud  $I_{k3}''$  při trojfázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} \quad [A, V, \Omega, -] \quad (4.23)$$

Počáteční rázový zkratový proud  $I_{k2}''$  při dvoufázovém zkratu:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} \quad [A, V, \Omega, -] \quad (4.24)$$

Počáteční rázový zkratový proud  $I_{k1}''$  při jednofázovém zkratu:

$$I_{k1(B)}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad [A, V, \Omega, -] \quad (4.25)$$

$c$	napětíový součinitel
$U_n$	jmenovité sdružené napětí sítě v místě zkratu
$Z_{(1)}$	sousledná impedance zkratového obvodu
$Z_{(2)}$	zpětná impedance zkratového obvodu
$Z_{(0)}$	netočivá impedance zkratového obvodu

Nárazový zkratový proud  $i_p$

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_k'' \quad [\text{A}, -] \quad (4.26)$$

$\kappa$  - součinitel nárazového zkratového proudu -  $\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3 \cdot R}{X}}$

$I_k''$  - počáteční rázový zkratový proud

Ekvivalentní oteplovací proud  $I_{th}$

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad [\text{A}, -] \quad (4.27)$$

$I_k''$  - počáteční rázový zkratový proud

$m$  - součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu

$n$  - součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu

Alternátor

$$X_{(1)} = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad [\text{A}, \Omega, \text{V}, \text{VA}] \quad (4.28)$$

$x_d''$  - rázová reaktance alternátoru

$U_{nG}$  - jmenovité napětí alternátoru

$S_{nG}$  - jmenovitý zdánlivý výkon alternátoru

Vedení

$$X_{(1)} = X_k \cdot l \quad [\Omega, \text{m}] \quad (4.29)$$

$$R_{(1)} = R_k \cdot l \quad [\Omega, \text{m}] \quad (4.30)$$

$X_k$  - reaktance sousledné složky vedení

$R_k$  - rezistance sousledné složky vedení

$l$  - délka vedení

Parametry jednotlivých prvků musíme přepočítat na napět'ovou hladinu v místě zkratu podle vztahu

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad [\Omega, \text{V}] \quad (4.31)$$

$Z_2$  - impedance přepočtena na napět'ovou hladinu  $U_2$  v místě zkratu

$Z_1$  - impedance na napět'ové hladině  $U_1$

### 4.3 Metodika dle IEC 61363-1

Oproti metodě dle normy ČSN EN 60909-1 je metoda dle mezinárodní normy IEC 61363-1, která je určena především pro výpočty v mobilních sítích v ostrovním režimu. Jelikož tyto metody uvažují síť s poměrně velkým výkonem, ve které je vzniklý zkrat blíže generátorům. Ve výpočtech je uvažováno s reálnými konstantami generátorů oproti tabulkovým dle normy ČSN EN 60909-0.

V normě IEC 61363-1 jsou uvažovány pouze zkraty souměrné trojpólové, vznikající spontánně v jeden okamžik buď vzájemným spojením fází mezi sebou, nebo společným spojením o trup lodi. Hlavní důvod výpočtu dle této normy je kvůli vyšším hodnotám nárazového a ustáleného zkratového proudu.

#### 4.3.1 Předpoklady výpočtu

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Všechny kapacity v síti jsou zanedbány;
- V okamžiku vzniku zkratu napětí jedné fáze prochází nulou;
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti;
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze;
- Odpory oblouku se neuvažují;
- Všechny generátory pracující paralelně jsou zatíženy proporcionálně;

Tyto předpoklady jsou velmi podobné výpočtům dle normy ČSN EN 60909-1.

#### 4.3.2 Výpočet třífázového zkratového proudu

Při výpočtu zkratového proudu jsou zařízení rozděleny na aktivní prvky soustavy a pasivní prvky soustavy. Aktivní prvky přispívají vlastní energií k velikosti zkratového proudu. Jsou to například synchronní generátory, asynchronní motory, synchronní kompenzátory, v menší míře i měniče kmitočtu.

Pasivními prvky rozumíme všechny ostatní, jako například kabely, transformátory, či reaktory. Tyto prvky omezují velikosti zkratových proudů.

**Aktivní prvky soustavy****- Synchronní generátory:**

Přičemž výpočet ustáleného zkratového proudu  $I_k$ , je dán součtem střídavé a stejnosměrné složky

$$I_k(t) = \sqrt{2} I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad [A] \quad (4.32)$$

Kde:

$I_k$       ustálený zkratový proud

$I_{ac}$       střídavá složka zkratového proudu

$I_{dc}$       stejnosměrná složka zkratového proudu

a) Střídavá složka zkratového proudu:

$$I_{ac}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd})e^{-t/T_d''} + (I'_{kd} - I_{kd})e^{-t/T_d'} + I_{kd} \quad [A, s] \quad (4.33)$$

Kde:

$I''_{kd}$       rázová sousledná složka zkratového proudu

$I'_{kd}$       přechodná sousledná složka zkratového proudu

$I_{kd}$       ustálená složka zkratového proudu

Rázová sousledná složka zkratového proudu:

$$I''_{kd} = \frac{E_{q0}''}{Z_d''} = \frac{E_{q0}''}{\sqrt{R_a^2 + X_d''^2}} \quad [A, \Omega, V] \quad (4.34)$$

$$I'_{kd} = \frac{E_{q0}'}{Z_d'} = \frac{E_{q0}'}{\sqrt{R_a^2 + X_d'^2}} \quad [A, \Omega, V] \quad (4.35)$$

$$I_{kd} = I_k \quad [A] \quad (4.36)$$

Kde:

$E_{q0}''$       rázové napětí synchronního stroje při jmenovitém zatížení

$E_{q0}'$       přechodné napětí synchronního stroje

$$I'_{kd} = \frac{E_{q0}'}{Z_d'} = \frac{E_{q0}'}{\sqrt{R_a^2 + X_d'^2}} \quad [A, \Omega, V] \quad (4.37)$$

$$E_{q0}'' = \frac{U_0}{\sqrt{3}} + I_0 Z_d'' \quad [A, \Omega, V] \quad (4.38)$$

$$E_{q0}' = \frac{U_0}{\sqrt{3}} + I_0 Z_d' \quad [A, \Omega, V] \quad (4.39)$$

Kde:

$\underline{Z}''_d$  rázová zkratová impedance

$\underline{Z}'_d$  přechodná zkratová impedance

$$\underline{Z}''_d = (R_a + jX''_d) \quad [\Omega] \quad (4.40)$$

$$\underline{Z}'_d = (R_a + jX'_d) \quad [\Omega] \quad (4.41)$$

b) Stejnoseměrná složka zkratového proudu:

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2}(I''_{kd} - I_0 \sin \varphi_0) e^{-t/T_{dc}} \quad [A, ms] \quad (4.42)$$

c) Nárazový zkratový proud

$$i_p = \sqrt{2}I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad [A] \quad (4.43)$$

#### - Asynchronní motory:

Impedance motoru:

$$R_M = R_R + R_S \quad [\Omega] \quad (4.44)$$

$$X''_M = X_R + X_S \quad [\Omega] \quad (4.45)$$

Kde:

$R_M$  odpor motoru

$X''_M$  reaktance motoru

$R_R$  odpor rotoru

$R_S$  odpor statoru

$X_R$  reaktance rotoru

$X_S$  reaktance statoru

Časové konstanty:

$$T''_M = \frac{(X_R + X_S)}{\omega_r R_R} \quad [\Omega, \text{rad.s}^{-1}] \quad (4.46)$$

Kde:

$T''_M$  rázová časová konstanta

$$T_{dcM} = \frac{(X_R + X_S)}{\omega_r R_S} \quad [\Omega, \text{rad.s}^{-1}] \quad (4.47)$$

Kde:

$T_{dcM}$  Stejnoseměrná časová konstanta

a) Střídavá složka zkratového proudu:

$$I_{acM}(t) = I''_M e^{-t/T''_M} M \quad [\text{A, ms}] \quad (4.48)$$

Kde:

$I''_M$  Rázový zkratový proud asynchronního motoru

$$I''_M = E''_M / \sqrt{(R_R + R_S)^2 + (X_R + X_S)^2} \quad [\text{A, V, } \Omega] \quad (4.49)$$

Kde:

$E''_M$  Rázové napětí asynchronního motoru

$$\underline{E''_M} = (\underline{U}_{rM} / \sqrt{3}) - \underline{I}_{rM} \underline{Z''_M} \quad [\text{A, V, } \Omega] \quad (4.50)$$

Kde:

$\underline{Z''_M}$  Rázová impedance asynchronního motoru

$$\underline{Z''_M} = R_M + jX''_M \quad [\Omega] \quad (4.51)$$

b) Stejnoseměrná složka zkratového proudu:

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2}(I''_M + I_{rM} \sin \phi_M) e^{-t/T} dcM \quad [\text{A, ms}] \quad (4.52)$$

c) Nárazový zkratový proud

$$i_{pM} = \sqrt{2} I_{acM}(t) + i_{dcM}(t) \quad [\text{A}] \quad (4.53)$$

**Pasivní prvky soustavy****- Kabely:**

impedance kabelových vedení je definována jako

$$\underline{Z}_C = R_C + jX_C \quad [\Omega] \quad (4.54)$$

Kde:

$\underline{Z}_C$  Impedance kabelu

$R_C$  Odpor kabelu

$X_C$  Reaktance kabelu

**- Transformátory:**

$$R_T = \frac{u_{rR}}{100} \cdot \frac{U_r^2}{S_{rT}} \quad [\Omega, -, V, VA] \quad (4.55)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad [\Omega] \quad (4.56)$$

$$Z_T = \frac{u_{rk}}{100} \cdot \frac{U_r^2}{S_{rT}} \quad [\Omega, -, V, VA] \quad (4.57)$$

Kde:

$Z_T$  Impedance transformátoru

$R_T$  Odpor transformátoru

$X_T$  Reaktance transformátoru

$u_{rR}$  činná složka jmenovitého napětí nakrátko

$u_{rk}$  napětí nakrátko transformátoru

$S_{rt}$  jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

$U_r$  jmenovité napětí transformátoru

**- Reaktory omezující zkratový proud:**

Činný odpor lze zanedbat – uvažujeme pouze reaktanci

$$X_L = u_{rL} U_r / (100 \sqrt{3} I_r) \quad [\Omega, -, V, VA] \quad (4.58)$$

Kde:

$X_L$  Reaktance reaktoru

$u_{rL}$  impedanční napětí reaktoru

## 5 Výkonová bilance v síti

### 5.1 Teorie

Jelikož je celé technologické zařízení instalované na lodi poměrně energeticky náročné, je nutné zjistit, jaké budou energetické požadavky pro jednotlivé operace. Musíme brát v úvahu všechny kombinace součinnosti zařízení a zjistit zejména nejhorší možné zatížení. Dále se musí v bilanci také počítat s energetickými požadavky na servisní úkony. Při pokládání potrubí je v činnosti většina systémů jako například tensionery, winche, jeřáby, vyrovnávače apod. jejich zatížení se v čase také mění a některé systémy při svých provozních stavem jsou schopny energii do sítě dodávat (spouštění břemen). Toto vše musíme vzít v úvahu a určení všech těchto aspektů pomáhá navrhnout optimální požadavky na elektrickou síť.

### 5.2 Load balance

Pokládkový systém typu reel-lay je vybaven prvky uvedenými v následující tabulce:

Tabulka 4: Příkony instalovaných systémů 690V/60Hz

Systém	Počet motorů	Výkon jednoho motoru	Celkový výkon	Účinnost pohonu	Celkový Příkon
	[-]	[kW]	[kW]	[-]	[kW]
325mt Flex Tensioner 1	8	90	720	0,9163	785,8
325mt Flex Tensioner 2	8	90	720	0,9163	785,8
10mt Winch	3	30	90	0,9000	100,0
15mt Winch	6	60	360	0,9000	400,0
30mt Winch	2	80	160	0,9000	177,8
50mt Initiation Winch	2	90	180	0,9000	200,0
380mt Traction Winch 1	6	200	1200	0,8820	1360,5
380mt Traction Winch 2	6	200	1200	0,8820	1360,5
15mt Storage Winch 1	2	55	110	0,8820	124,7
15mt Storage Winch 2	2	55	110	0,8820	124,7
Spooling Tensioner 1	2	50	100	0,9163	109,1
Spooling Tensioner 2	2	50	100	0,9163	109,1
2500mt Basket	3	74	222	0,8500	261,2
1500mt Basket	2	74	148	0,8500	174,1
25mt Hoisting Beams Trolley Travel Winch	2	10	20	0,8500	23,5
25mt Hoisting Beams Hoist Winch	2	82	110	0,8500	129,4



Tabulka 5: Zatížení při jednotlivých provozních stavech 690V/60Hz

Operace System	Vytažení trubky pomocí tensioneru		Vytažení trubky pomocí A&R systém		Navíjení trubky do basketu		Iniciace	
	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon
	$\beta$ [-]	$P_s$ [kW]	$\beta$ [-]	$P_s$ [kW]	$\beta$ [-]	$P_s$ [kW]	$\beta$ [-]	$P_s$ [kW]
325mt Flex Tensioner 1	1,0	785,8	0,1	78,6	0,1	78,6	1,0	785,8
325mt Flex Tensioner 2	1,0	785,8	0,1	78,6	0,1	78,6	1,0	785,8
10mt Winch	0,5	50,0	0,1	10,0	0,5	50,0	0,5	50,0
15mt Winch	0,5	200,0	0,1	40,0	0,5	200,0	0,5	200,0
30mt Winch	0,5	88,9	0,1	17,8	0,5	88,9	0,5	88,9
50mt Initiation Winch	0,5	100,0	0,1	20,0	0,5	100,0	1,0	200,0
380mt Traction Winch 1	0,1	136,1	1,0	1360,5	0,1	136,1	0,1	136,1
380mt Traction Winch 2	0,1	136,1	1,0	1360,5	0,1	136,1	0,1	136,1
15mt Storage Winch 1	0,1	12,5	1,0	124,7	0,1	12,5	0,1	12,5
15mt Storage Winch 2	0,1	12,5	1,0	124,7	0,1	12,5	0,1	12,5
Spooling Tensioner 1	0,1	10,9	0,1	10,9	1,0	109,1	0,1	10,9
Spooling Tensioner 2	0,1	10,9	0,1	10,9	1,0	109,1	0,1	10,9
2500mt Basket	1,0	261,2	0,1	26,1	1,0	261,2	1,0	261,2
1500mt Basket	0,5	87,1	0,1	17,4	0,5	87,1	0,5	87,1
25mt Hoisting Beams Travel Winch	0,1	2,4	0,1	2,4	0,1	2,4	1,0	23,5
25mt Hoisting Beams Hoist Winch	0,1	12,9	0,1	12,9	0,1	12,9	1,0	129,4
<b>Maximální soudobý příkon [kW]</b>		<b>2693</b>		<b>3296</b>		<b>1475</b>		<b>2930</b>

Koeficient soudobosti  $\beta$ : určuje reálné zatížení daného zařízení

$$\beta = \frac{k_s \cdot k_z}{\eta_m \cdot \eta_s} \quad [-] \quad (5.1)$$

Kde:

$k_s$  – činitel současnosti – poměr okamžitého výkonu a celkového instalovaného výkonu

$$k_s = \frac{\sum P_{is}}{\sum P_i} \quad [-] \quad (5.2)$$

$k_z$  – činitel zatížitelnosti – poměrné zatížení skupiny zařízení v dané skupině

$$k_z = \frac{\sum P_s}{\sum P_{ns}} \quad [-] \quad (5.3)$$

$\eta_m$  – účinnost při daném činiteli využití

$\eta_s$  – účinnost napájecí soustavy

Účinnost pohonu: jedná se o součin účinnosti elektrického motoru a měniče

Z takto připravených bilancí zjišťujeme, že nejvíce energie bude systém potřebovat při vyzvedávání trubky z mořského dna pomocí traction winches. Tato operace je vykonávána vždy, když jsou pokládací operace přerušeny. Po vytažení trubky do moonpool oblasti, je zde provedeno napojení na novou trubku a pokračuje se v režimu pokládání.

Z výkonové bilance jsme zjistili, že příkon bude až 3296kW, z tohoto důvodu s ohledem na rezervu v systému je požadován transformátor o výkonu 3600kVA. Ten bude připojen k pátevní síti 3 ~ 6,6kV / 60Hz / IT.

Kromě těchto hlavních systémů připojených k síti 690V~ 60Hz jsou zde také podpůrné systémy na napětíových hladinách 440V~ 60Hz, 230V~ 60Hz a 110V~ 60Hz.

Z obr. 29 je zřejmé, že při dimenzování úseku U12 je potřeba jeho systémy posoudit zvlášť.

V tabulce 6 jsou separovány její odběrné místa.

Tabulka 6: Zatížení v úseku U12 při jednotlivých provozních stavech 690V/60Hz

Operace  Systém	Vytažení trubky pomocí tensioneru		Vytažení trubky pomocí A&R systém		Navíjení trubky do basketu		Iniciace	
	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon
	$\beta$ [-]	$P_s$ [kW]	$\beta$ [-]	$P_s$ [kW]	$\beta$ [-]	$P_s$ [kW]	$\beta$ [-]	$P_s$ [kW]
10mt Winch	0,5	50,0	0,1	10,0	0,5	50,0	0,5	50,0
15mt Winch	0,5	200,0	0,1	40,0	0,5	200,0	0,5	200,0
30mt Winch	0,5	88,9	0,1	17,8	0,5	88,9	0,5	88,9
2500mt Basket	1,0	261,2	0,1	26,1	1,0	261,2	1,0	261,2
1500mt Basket	0,5	87,1	0,1	17,4	0,5	87,1	0,5	87,1
<b>Maximální soudobý příkon [kW]</b>		<b>687</b>		<b>111</b>		<b>687</b>		<b>687</b>

Tabulka 7: Zatížení při jednotlivých provozních stavech 440V/60Hz

<div>Operace</div> <div>System</div>			Vytažení trubky pomocí A&R systém		Spooling basket	
	Počet odběrných míst	Celkový příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon
	[-]	[kVA]	$\beta$ [-]	$P_s$ [kVA]	$\beta$ [-]	$P_s$ [kVA]
325mt Flex Tensioner 1 chlazení	16	16,8	0	0	0	0
325mt Flex Tensioner 2 chlazení	16	16,8	0	0	0	0
10mt Winch chlazení + mazání	7	9,3	0	0	1	9,3
15mt Winch chlazení + mazání	13	17,1	0	0	1	17,1
30mt Winch chlazení + mazání	5	6,7	0	0	1	6,7
50mt Initiation Winch chlazení + mazání	5	6,7	0	0	1	6,7
380mt Traction Winch 1 chlazení + mazání	13	37,5	1	37,5	0	0
380mt Traction Winch 2 chlazení + mazání	13	37,5	1	37,5	0	0
15mt Storage Winch 1 chlazení + mazání	5	6,7	1	6,7	0	0
15mt Storage Winch 2 chlazení + mazání	5	6,7	1	6,7	0	0
Spooling Tensioner 1 mazání, chlazení + HPU	5	43,2	0	0	1	43,2
Spooling Tensioner 2 mazání, chlazení + HPU	5	43,2	0	0	1	43,2
2500mt Basket mazání + chlazení	7	12	0	0	1	12
1500mt Basket mazání + chlazení	5	8,5	0	0	1	8,5
25 mt Hoisting Beams	2	15	0	0	0	0
Transformátor 440/230V	1	250	1	250	1	250
Transformátor 440/110V	1	40	1	40	1	40
Záložní zdroj 24V	1	11	1	11	1	11
Ostatní	1	50	1	50	1	50
<b>Celkový soudobý příkon [kVA]</b>				<b>439</b>		<b>498</b>

Z této energetické bilance jsme zjistili, že nejvyšší nároky, bude mít systém při navíjení potrubí do zásobníků. Potřebný příkon 498kVA bude pokrývat transformátor T11 630kVA, připojený k páteřní síti 3 ~ 6,6kV / 60Hz / IT.

Tabulka 8: Zatížení při jednotlivých provozních stavech 230V/60Hz

Systém	Počet odběrných míst	Příkon	Celkový příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon
	[-]	[kVA]	P [kVA]	$\beta$ [-]	P <sub>s</sub> [kVA]
Rozváděč ovládání měničů	2	6	12	1	12
Hlavní ovládací rozváděč	2	2	4	1	4
Hlavní napájecí rozváděč	2	2	4	1	4
Tensioner 1 napájecí a ovládací rozváděč	1	3,25	3,25	1	3,25
Tensioner 2 napájecí a ovládací rozváděč	1	3,25	3,25	1	3,25
10mt Winch napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
15mt Winch napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
30mt Winch napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
50mt Winch napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
380mt Traction Winch 1 napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
380mt Traction Winch 2 napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
15mt Storage Winch 1 napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
15mt Storage winch 2 napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
Spooling Tensioner 1 napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
Spooling Tensioner 2 napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
2500mt Basket napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
1500mt Basket napájecí a ovládací rozváděč	1	3	3	1	3
25mt Hoisting Beams	2	3	6	1	6
Osvětlení rampa	50	0,12	6	1	6
Osvětlení tensionery	30	0,12	3,6	1	3,6
Osvětlení adjusters	20	0,12	2,4	1	2,4
Halogenové osvětlení	8	0,64	5,12	1	5,12
Zásuvky 16A rampa	5	3,6	18	0,6	10,8
Zásuvky 32A rampa	5	7,4	37	0,6	22,2
Ostatní	1	20	20	1	20
Napájecí a ovládací rozváděč rezerva	1	3	3	1	3
Rozhraní	1	8	8	1	8
Pomocný jeřáb	1	3	3	1	3
Ovládací panel	3	3	9	1	9
Ovládací panel topení a klimatizace	1	10	10	1	10
Zásuvky 16A	4	3,6	14,4	0,6	8,64
Basket kabina včetně klimatizace	2	4,6	9,2	1	9,2
Spooling kabina	1	3	3	1	3
Klimatizace rozvodna	1	6,5	6,5	1	6,5
Pomocný vrátek	1	1	1	1	1
<b>Celkový soudobý příkon [kVA]</b>					<b>200</b>

Zatížení sítě 230V/60Hz je takřka konstantní pro všechny pokládací operace a to 200kVA.

Tabulka 9: Zatížení záložní zdroj 24VDC

Systém	Celkový příkon	Koeficient soudobosti	Soudobý příkon
	P [W]	$\beta$ [-]	$P_s$ [W]
Střídač 230V	6000	0,8	4800
Rozváděč ovládání měničů	600	1	600
Hlavní ovládací rozváděč	600	1	600
Hlavní napájecí rozváděč	300	1	300
Tensioner 1 napájecí a ovládací rozváděč	280	0,8	224
Tensioner 2 napájecí a ovládací rozváděč	280	0,8	224
10mt Winch napájecí a ovládací rozváděč	200	0,8	160
15mt Winch napájecí a ovládací rozváděč	200	0,8	160
30mt Winch napájecí a ovládací rozváděč	200	0,8	160
50mt Winch napájecí a ovládací rozváděč	200	0,8	160
380mt Traction Winch 1 napájecí a ovládací rozváděč	360	0,8	288
380mt Traction Winch 2 napájecí a ovládací rozváděč	360	0,8	288
15mt Storage Winch 1 napájecí a ovládací rozváděč	200	0,8	160
15mt Storage winch 2 napájecí a ovládací rozváděč	200	0,8	160
Spooling Tensioner 1 napájecí a ovládací rozváděč	280	0,8	224
Spooling Tensioner 2 napájecí a ovládací rozváděč	280	0,8	224
2500mt Basket napájecí a ovládací rozváděč	190	0,8	152
1500mt Basket napájecí a ovládací rozváděč	190	0,8	152
Adjuster 1 napájecí a ovládací rozváděč	220	0,8	176
Adjuster 2 napájecí a ovládací rozváděč	220	0,8	176
Hlídací obvod akumulátorů	240	0,25	60
Ostatní periferie	800	0,9	720
<b>Celkový příkon [W]</b>			<b>10358</b>

Pro návrh záložního zdroje je podmínka doby zálohy minimálně 1hod, přídavné ztráty v systému a úbytek kapacity akumulátorů pokryje prodloužení uvažované doby zálohy na 1,5hod.

## 6 Návrh stejnosměrné distribuční sítě

### 6.1 Společná stejnosměrná síť

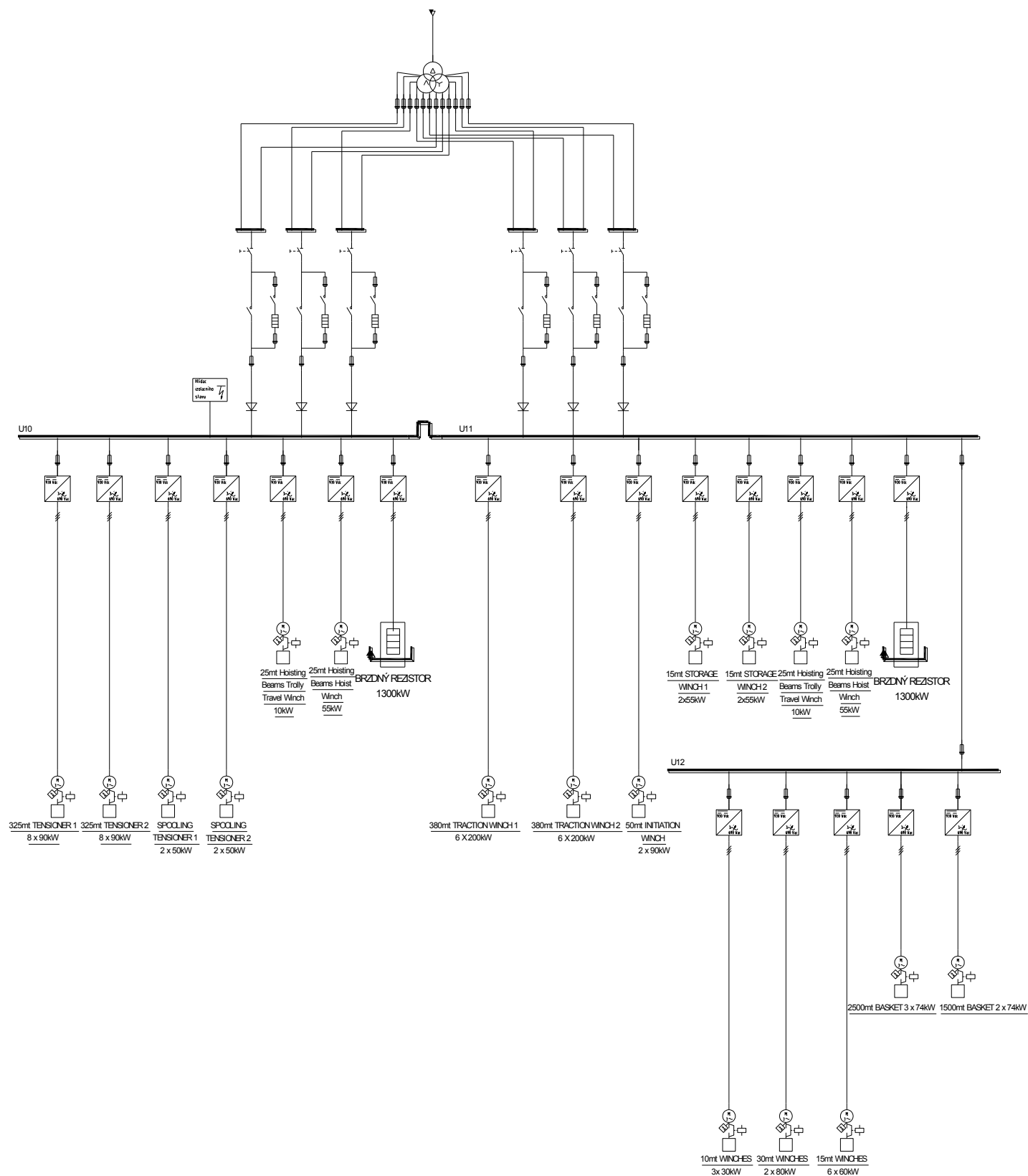
Hlavním důvodem k využití společné distribuční sítě mezi jednotlivými zařízeními je efektivní využívání elektrické energie, kterou jsou zařízení schopny při svém provozu dodávat zpět do této sítě. Ve stejnou chvíli, kdy jedno zařízení energii do sítě dodává, může jiné zařízení tuto energii využít. Pokud není možno tuto energii využít - což nastává hlavně v době nouzového zastavení, jsou k této stejnosměrné síti připojeny brzdné rezistory, které skrze tzv. choppers mění přebytkovou elektrickou energii v tepelnou. Ta může být využita pro ohřev technologické vody, či lokálním vytápění. Případně je vracena ve formě teplé vody do moře.

Mezi hlavní výhody patří:

- Zvýšení efektivity distribuce elektrické energie mezi jednotlivé technologie při použití frekvenčních měničů,
- Snižuje náklady, protože na vstupu každého měniče není potřeba usměrňovací jednotka,
- Zjednodušuje paralelní chod generátorů,
- Zvýšení celkové spolehlivosti napájení,
- Snížení zpětných vlivů na napájecí síť - zejména nežádoucí vyšší harmonické.

Mezi nevýhody patří:

- Složitější jištění stejnosměrné sítě oproti střídavé,
- Nutnost propojení rozvodů mezi sebou a tím použití další elektrické výzbroje,
- Použití vyhrazeného brzdného invertoru nebo chopperu spolu s brzdým rezistorem dimenzovaným na výkon, který budou zařízení do sítě dodávat, či v případě nouzového zastavení krátkodobě dodají.



Obr. 29: Zjednodušené přehledové schéma stejnosměrné sítě

## 6.2 Dimenzování stejnosměrné sítě

Napětí VN 6,6kV je přivedeno k trojvintuřovému transformátoru T10 o výkonu 3600kVA který má k sekundární straně 690V připojeny dvě usměrňovací jednotky každou o jmenovitém výkonu  $P_n = 2000\text{kVA}$ .

Rozvodna je dělena na tři úseky U10, U11 a U12. Napětí 690V z transformátoru je přivedeno kabelovým vedením  $2//3 \times 120\text{mm}^2$  k 12 pulsním usměrňovacím jednotkám. Pro snížení zapínací proudové špičky, je stejnosměrná síť nabíjena obvodem, který omezuje maximální proud a nabije v této sběrnici kondenzátory před připojením hlavních usměrňovačů. Celý stejnosměrný rozvod v rozvodně je řešen pomocí měděných profilů vedoucí skrz všechny rozváděče. Za pomoci přípojnicového systému ABB, jsou v jednotlivých rozváděčích přes pojistkové bloky připojeny jednotlivé měniče kmitočtu.

Střední hodnota napětí ve stejnosměrné síti je po 12 pulsním usměrnění dána vztahem:

$$U_{d0} = \frac{q}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ef} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \quad [\text{V}, -] \quad (6.1)$$

$$U_{d0} = \frac{12}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 690 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) = 965\text{V}$$

Kde:

$U_{ef}$       efektivní hodnota napájecího napětí usměrňovače

$U_{d0}$       střední hodnota usměrněného napětí naprázdno

$q$       počet pulzů usměrňovače (počet komutací z jedné větve na jinou během jedné periody)

Díky užití dvou paralelních usměrňovacích jednotek v sekcích U10 a U11 bude proud na výstupech poloviční.

Při napětí 965V bude maximální proud za usměrňovači:

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_{d0} \cdot m} \quad [\text{V}, \text{W}, \text{A}, -] \quad (6.2)$$

$$I_{max} = \frac{3296 \cdot 10^3}{965 \cdot 2} = 1707\text{A}$$



$I_{\max}$	maximální proud za usměřňovačem
$P_{\max}$	výkon při největším odběru
$m$	počet usměřňovačů

Při dimenzování průřezu těchto přípojníc musíme respektovat jak maximální hodnoty proudu, tak i maximální napětí na přípojnících, protože v případě brzdění je hodnota maximálního napětí na sběrnici až 1135V

Sběrnici budeme dimenzovat pro konstantní proudovou hustotu  $\sigma = 1,5 \text{ A. mm}^{-2}$

Průřez holého měděného profilu pak bude:

$$S_{Cu} = \frac{I_{\max}}{\sigma} \quad [\text{A, mm}^2, \text{A. mm}^{-2}] \quad (6.3)$$

$$S_{Cu} = \frac{1707}{1,5} = 1138 \text{ mm}^2 \xrightarrow{\text{po zaokrouhlení}} 1200 \text{ mm}^2$$

Kde:

$S_{Cu}$	Průřez přípojnice
$\sigma$	Proudová hustota

Vypočtenému průřezu odpovídá měděný profil 120x10mm. Stejným profilem je provedeno propojení s úsekem U11.

Dle tabulky č. 8 jsme zjistili, že maximální odebíraný výkon z úseku U12 je při vytahování trubky pomocí tensioneru. a to 687kW. Kabelový spoj je nutno dimenzovat na proud:

$$I_{U12} = \frac{P_{U12}}{U_{d0}} \quad [\text{V, W, A, -}] \quad (6.4)$$

$$I_{U12} = \frac{687 \cdot 10^3}{935} = 734,8 \text{ A}$$

Kde:

$I_{U12}$	Proud úseku U12
$P_{U12}$	Výkon odebíraný v úseku U12

Maximální proud odebíraný v úseku U12 je při maximálním odběru  $I_{U12}=734,8\text{A}$

Tento úsek není možné připojit pomocí měděné pásoviny, ale musíme použít kabel. Při zachování proudové hustoty  $\sigma = 1,5 \text{ A. mm}^{-2}$  bude potřeba průřez:

$$S_{U12} = \frac{I_{U12}}{\sigma} \quad [\text{A, mm}^2, \text{A. mm}^{-2}] \quad (6.5)$$

$$S_{U12} = \frac{734,8}{1,5} = 489,9 \text{ mm}^2$$

Kde:

$S_{U12}$     Průřez kabelu k úseku U12

$I_{U12}$     Maximální proud úseku U12

Nejbližše tomuto průřezu je použití dvou kabelů  $4 \times 70 \text{ mm}^2$  – celkový průřez dvou kabelů paralelně průřezu  $560 \text{ mm}^2$ . Potřebná délka kabelu je 15m. Přehledové schéma odběrů je na obrázku 29.

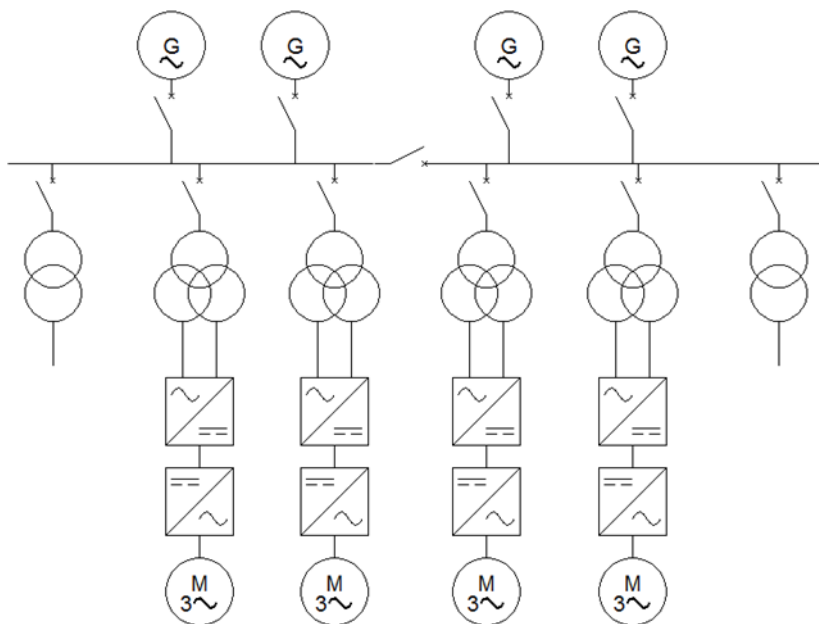


*Obr. 30: Měděné přípojnice v rozvaděčích*

### 6.3 Využití stejnosměrných sítí v budoucnu

Celý systém využívání společného stejnosměrného meziobvodu mezi měniči má kromě již zmíněných výhod a nevýhod ještě jednu nevýhodu a tou je cena a hmotnost celého systému.

V dnešní době je využívána klasická koncepce, kdy za generátory jsou transformátory, a pomocí vysokého napětí (6/6,6kV) je proveden rozvod elektrické energie do jednotlivých rozvodů na lodi. V těchto rozvodnách musí být transformátory, které napětí sniží na potřebnou úroveň.

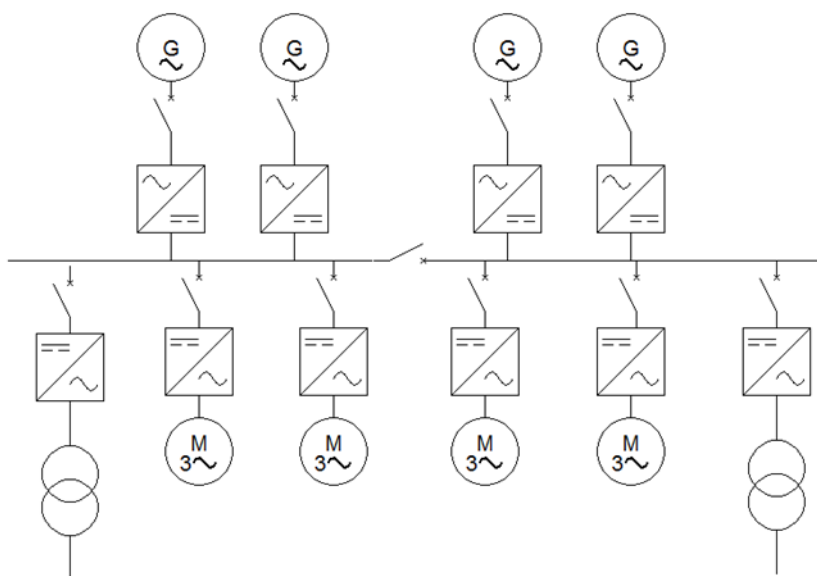


Obr. 31: Jednopólové schéma střídavé sítě

Toto řešení má nevýhodu v nutnosti použití velkého množství transformátorů, pro systémy výkonných pohonů se musí použít tří-vinutové transformátory poté je napětí usměrněno a následně se v měniči transformuje na říditelné střídavé napětí pro řízení pohonů. Jak již bylo řečeno mezi měniči je opět využít rozvod pomocí stejnosměrného napětí.

Nevýhodou je i fakt, že motory pohánějící generátory musí pracovat v synchronních otáčkách sítě (50/60Hz), a často tedy pracují zejména při nižším zatížení při nízké účinnosti.

Řešením by bylo využití stejnosměrné sítě v páteřní distribuci elektrické energie. Generátory by pracovaly přímo do říditelných polovodičových usměrňovacích jednotek. Přímou z těchto jednotek by byla rozvedena síť po celé lodi dvěma paralelními větvemi na pravoboku a levoboku, které by se sbíhaly na přídi a tvořily by tak kruhovou síť. Jednotlivé odběrné místa by byly připojeny přímo pomocí měničů kmitočtu, které by již nepotřebovaly usměrňovač. Vynecháním transformátorů lze dosáhnout dalšího zvýšení účinnosti. Navíc je zjednodušen paralelní chod generátorů, je možno provozovat více menších a ty dle potřeby odstavit více generátorů také zvyšuje redundanci celého systému.



Obr. 32: Jednopolové schéma stejnosměrné sítě

Mezi další výhody patří:

- Nižší spotřeba paliva až o 20% díky variabilním otáčkám generátorů
- Úspora místa na palubě lodi až o 30% oproti klasickému systému rozvodu a transformátorů
- Flexibilní využití takto vyrobeného plavidla
- Snížení konstantního hluku Dieslových generátorů.
- Nižší zpětné vlivy na síť

Samozřejmě, že i tento má systém jisté nevýhody, které ale v budoucnosti budou minimalizovány užitím pokrokových technologií, jako jsou supravodiče apod. Další diskutované téma je bezpečnost těchto systémů z hlediska ochrany před zkratovými proudy, jelikož na rozdíl od střídavé sítě nelze vypínaný proud přerušit v jeho přirozené nule. Tady je ovšem opět prostor namísto přerušení oblouku v klasických jističích či pojistkami užít polovodičové jističe, které budou schopny přerušit poruchový proud ještě před nárůstem do vysokých hodnot. Tyto jističe jsou na rozdíl od mechanických jističů schopny vybavit již v časech pod  $1\mu s$ .

Nevýhodou je také nutnost napájení odběrů vyžadující konstantní frekvenci invertory, které mohou produkovat rušivé vyšší harmonické, případně musí být vybaveny drahými filtry.

Pokud bychom připojili systém pokládky potrubí k této stejnosměrné síti, bylo by možné využívat všechny benefity plynoucí z této technologie. Navíc při pokládání potrubí je více elektrické energie rekuperováno, takže by bylo možné tuto energii určitě využít v jiných systémech lodi, pokud by nebyl zajištěn odběr pouze v rámci systému pokládky.

## 7 Návrh a dimenzování systému pohonů, brzdných odporů a UPS

### 7.1 Pohony a soustavy pohonů

Oproti klasickému systému, kdy každý motor má svůj samostatný měnič, má řešení na společné sběrnici kromě výhod uvedených v kapitole 6 také výhodu v úspoře místa při stejném výkonu.

Navržený systém pohonů multidrive je od společnosti ABB, která dodává soustavy těchto měničů včetně usměrňovacích jednotek, brzdných jednotek, připojovacího systému apod.



*Obr. 33: Soustava pohonů multidrive ABB ACS800*

#### 7.1.1 Dimenzování pohonů

V běžném provozu na pevnině je běžné vybrat měnič dle výkonu motoru, případně dle druhu provozu a četnosti případných přetížení apod. V námořních aplikacích je nutné mít pro každý pohon v záloze veškeré prvky, aby v případě poruchy jednoho prvku v síti nebyl provoz omezen, do doby dodání nového dílu. Z důvodu omezených skladových prostor není možné mít širokou škálu měničů v záloze, a proto je většina měničů předimenzována často o více než 50% právě

z důvodu menší diverzity záložních zásob. Kromě této výhody má předimenzování pozitivní vliv na prodloužení životnosti měniče.

V tabulce č. 10 jsou kombinace motorů s měniči. Měníče ve většině výkonově odpovídají dovolenému zatížení při těžkém provozu, přestože takový provoz není vyžadován.

Tabulka 10: *Výběr měničů*

Systém	Motor		Měnič ABB		
	Počet motorů	Jmenovitý výkon	Typ	Jmenovitý výkon $P_n$	Jmenovitý výkon při těžkém provozu $P_{hd}$
	[-]	[kW]	[-]	[kW]	[kW]
325mt Tensioner 1	8	90	ACS800-104-0215-7	160	110
325mt Tensioner 2	8	90	ACS800-104-0215-7	160	110
10mt Winch	3	30	ACS800-104-0075-7	55	45
15mt Winch	6	60	ACS800-104-0105-7	75	55
30mt Winch	2	80	ACS800-104-0175-7	132	90
50mt Initiation Winch	2	90	ACS800-104-0215-7	160	110
380mt Traction Winch 1	6	200	ACS800-104-0320-7	250	200
380mt Traction Winch 2	6	200	ACS800-104-0320-7	250	200
15mt Storage Winch 1	2	55	ACS800-104-0105-7	75	55
15mt Storage Winch 2	2	55	ACS800-104-0105-7	75	55
Spooling Tensioner 1	2	50	ACS800-104-0105-7	75	55
Spooling Tensioner 2	2	50	ACS800-104-0105-7	75	55
2500mt Basket	3	74	ACS800-104-0175-7	132	90
1500mt Basket	2	74	ACS800-104-0175-7	132	90
25mt Hoisting Beams Trolley Travel Winch	2	10	ACS800-104-0016-7	15	7,5
25mt Hoisting Beams Hoist Winch	2	55	ACS800-104-0105-7	75	55

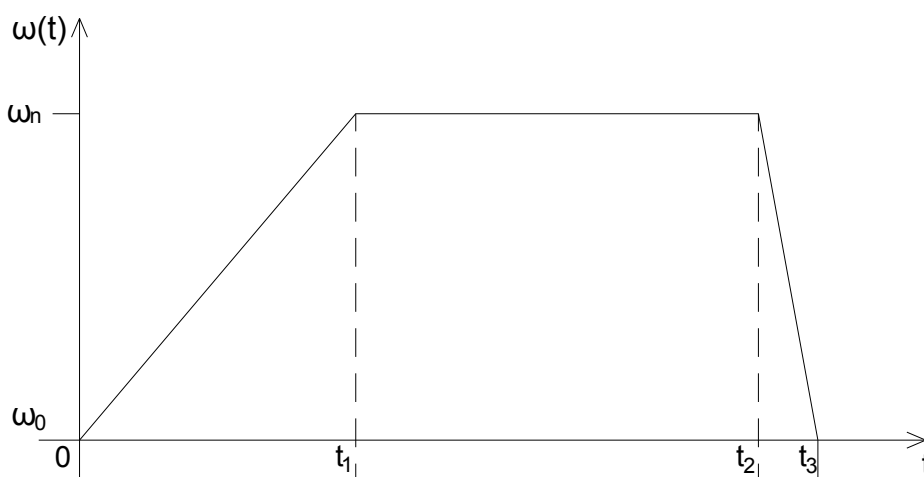
Těžký provoz: dovoluje zařízení přetěžovat až 150%  $P_{hd}$  1min každých 5minut.

## 7.2 Brzdné rezistory

Při normálním běhu asynchronního stroje, jsou otáčky hřídele nižší než nastavené synchronní otáčky na výstupu měniče kmitočtu. Tento režim nazýváme motorický. Naopak pokud se rotor asynchronního motoru otáčí rychleji než nastavené otáčky měniče, tak motor přeměňuje mechanickou energii na hřídeli na elektrickou, která je přiváděna zpátky do měniče. Tento proces se také nazývá rekuperace.

Při této rekuperaci se zvyšuje napětí v meziobvodu měniče, v našem případě ve společné stejnosměrné sběrnici, a pokud toto napětí překročí určitou mez, hrozí zničení samotného měniče, kondenzátorů v meziobvodu, či nouzové odpojení měniče, doprovázeného odpojením poháněného motoru. Tato situace může vrcholit až nekontrolovatelným roztočením hřídele. Zabránit této situaci můžeme několika způsoby:

- Vrátit energii zpět do sítě – dražší řešení, které předpokládá aktivní usměrňovací prvek na vstupu stejnosměrné sítě. Další nevýhodou může být zvýšení rušení v síti, a pokud a stále musíme mít na této síti spotřebiče, které tuto dodanou energii využijí.
- Přeměnit elektrickou energii v tepelnou – jednodušší řešení, při kterém je pomocí brzdného chopperu připojována stejnosměrná síť k tzv. brzdným rezistorům. Tento proces nazýváme dynamické brzdění. Nevýhoda je, že je toto teplo často zmařeno bez dalšího využití a celý systém ztrácí na účinnosti.



Obr. 34: Profil rychlosti při rozběhu a zastavení

$\omega_n$	nominální otáčky pohonu [ $\text{rad.s}^{-1}$ ]
$\omega_0$	nulové otáčky pohonu [ $\text{rad.s}^{-1}$ ]
$t_1$	čas dosažení nominálních otáček[s]
$t_2$	čas signálu k nouzovému zastavení[s]
$t_3$	čas kdy došlo k zastavení pohonu[s]

### 7.2.1 Dimenzování brzdného rezistoru

Pro dimenzování brzdného rezistoru je potřeba určit maximální brzdný výkon. Ten se odvíjí od velikosti momentu setrvačnosti motorů a zátěže. Nejnepříznivější situace, pro kterou se musí brzdné rezistory dimenzovat, je nouzové zastavení při spouštění trubky pomocí tensionerů. V tento okamžik musí všechny pohony zastavit po předem definované rampě  $t_{\text{stop}} = t_2 - t_3 = 1,2\text{s}$ . Při zastavení nejsou ze stejnosměrné sítě žádné odběry a všechna energie musí projít přes brzdné rezistory.

Pro výpočet je potřeba zjistit následující údaje:

- Otáčky maximální otáčky motorů  $n$  [-];
- Potřebný čas k zastavení (rampa)  $t_{\text{stop}}$  [s];
- Moment setrvačnosti motoru  $J_M$  [kg.m<sup>2</sup>];
- Moment setrvačnosti zátěže  $J_L$  [kg.m<sup>2</sup>];
- Převodový poměr soustrojí  $i$  [-];

#### Výpočet momentu setrvačnosti:

$$J_T = J_m + (i^2 \times J_L) \quad [\text{kg.m}^2, -] \quad (7.1)$$

$$i = \frac{\text{otáčky zátěže}}{\text{otáčky motoru}} \quad [\text{rad.s}^{-1}, -] \quad (7.2)$$

$$i = \frac{12}{3396} = 3,556 \cdot 10^{-3}$$

Z katalogu víme, že moment setrvačnosti motoru  $J_M = 2,29 \text{ kg.m}^2$

Z mechanických výpočtů víme, že moment setrvačnosti jedné dráhy tensioneru včetně momentu setrvačnosti trubky je  $J_L = 29078 \text{ kg.m}^2$

Celkový moment setrvačnosti jedné dráhy tedy je:

$$J_T = 2,29 + [(3,556 \cdot 10^{-3})^2 \times 29078]$$

$$J_T = 2,6577 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$



**Výpočet špičkového brzdného výkonu:**

$$P_b = J_T \cdot \left( \frac{n}{60} \cdot 2\pi \right)^2 \cdot \frac{1}{t_{stop}} \quad [\text{kg.m}^2, \text{-,s}] \quad (7.3)$$

$$P_b = 2,6577 \cdot \left( \frac{3396}{60} \cdot 2\pi \right)^2 \cdot \frac{1}{1,2} = 280,1 \text{ kW}$$

Tento potřebný špičkový brzdný příkon je potřeba vynásobit počtem drah a počtem tensionerů

$$P_{btot} = P_b \cdot m_d \cdot m_t \quad [\text{W, -}] \quad (7.4)$$

$$P_{btot} = 280,1 \cdot 4 \cdot 2 = 2241 \text{ kW}$$

$P_{btot}$  celkový špičkový brzdný příkon;

$m_d$  počet drah jednoho tensioneru;

$m_t$  počet tensionerů.

Celková potřeba špičkového brzdného příkonu bude až 2241kW. Tento brzdný příkon je potřeba porovnat s maximálním možným příkonem vybraného brzdného chopperu. V případě, že by byl tento příkon větší než dovolený příkon chopperu, je nutné zvolit buď chopper větší, nebo zkrátit dobu zastavení, druhá možnost není žádoucí.

K vybranému brzdnému chopperu ABB ACS800-604-1300-7 je možné připojit 3 brzdné rezistory s minimální hodnotou 2Ω. Teoretický maximální brzdný příkon je:

$$P_{bch} = 3 \cdot \frac{U_{dcm}^2}{R} \quad [\Omega, \text{V, W}] \quad (7.5)$$

$$P_{bch} = 3 \cdot \frac{1135^2}{2} = 1932 \text{ kW}$$

Výrobce brzdné jednotky ovšem dle katalogu ovšem povoluje maximální brzdný příkon  $P_{bchmax}=1660 \text{ kW}$ .

Jelikož  $P_{bchmax} < P_{btot}$  je nutné zvětšit výkon brzdného chopperu. Použijeme tedy paralelně další stejnou brzdnu jednotku ABB ACS800-604-1300-7. Stejný typ je zvolen opět z důvodu jednotného záložního kusu. Tímto docílíme maximálního možného brzdného příkonu 3320kW.

**Výpočet potřebného jednoho brzdného rezistoru:**

Víme, že špičkový brzdný příkon se rozdělí mezi dvě brzdné jednotky, tedy

$$P_{btcp} = \frac{P_{btot}}{2} = \frac{2241}{2} = 1120,5kW$$

Kde:

$P_{btcp}$  maximální brzdný výkon jednoho chopperu

Jelikož je možné brzdné rezistory krátkodobě přetížit až o 150% bude potřebný celkový příkon brzdného rezistoru o toto možné přetížení menší:

$$P_{btr} = \frac{P_{btcp}}{1,5} = \frac{1120,5}{1,5} = 747 kW$$

Kde:

$P_{btr}$  minimální potřebný brzdný výkon jednoho třífázového rezistoru

Dostačující hodnota rezistoru by byla 747kW. Z důvodu preferencí zákazníka byl zvolen vodou chlazený rezistor o maximálním příkonu 1300kW. Rezistor je tedy výkonově předimenzován o více než 57%.



*Obr. 35: Vodou chlazený brzdný rezistor SINUS JEV iΩ*

## 7.3 UPS

Uninterruptable Power Supply, neboli zdroj nepřetržitého napájení. Jedná se o zařízení, kterým jsou napájeny důležité obvody daného zařízení, které by v případě výpadku napájení mohly způsobit nevratné škody na majetku či zdraví. UPS dokáže vykryt jakékoliv nepříznivé podmínky v síti, jako například podpětí, přepětí, kolísání frekvence, harmonické zkreslení, či úplný výpadek napájení. UPS je méně či více složitý střídač, který je napájen v případě výpadku napájení z akumulátorů.

UPS zdroje se dělí dle principu na několik kategorií:

- OFF-LINE – napětově závislé – nejjednodušší řešení, tyto zdroje jsou připojeny stále k napájecí síti a zátěž je připojena přes filtr přímo k síti. Zdroj toto napájecí napětí sleduje, a pokud dojde k výpadku napájecí sítě, záložní zdroj se přepne na střídač napájený z baterií. Obvykle se jedná o levnější přístroje, jejichž výstupní napětí nebývá sinusového průběhu a citlivé zařízení mohou paradoxně při provozu z tohoto zdroje vykazovat zhoršené chování.
- LINE interactive – napětově nezávislé – zdokonalená varianta off-line záložních zdrojů. Za normálních podmínek pracuje stejně jako UPS typu off-line, navíc ale střídač pracuje paralelně s napájecím napětím, které dokáže v případě napětových rázů, podpětí, přepětí účinně korigovat.
- ON-LINE – napětově a frekvenčně nezávislé – nejdokonalejší řešení UPS. Tyto zdroje pracují na principu dvojité konverze napětí, kdy jsou všechny spotřebiče napájeny ze střídače v normálním režimu. Vstupní napětí je usměrněno a následně je přivedeno do střídače. Díky usměrnění napájecího napětí si polovodičový střídač poradí se všemi problémy na vstupní straně a v případě úplného výpadku napájení pracuje z akumulátorů.

### 7.3.1 Parametry záložního zdroje

Mezi základní parametry každé UPS je požadovaný výkon (kVA), druhým parametrem je samozřejmě doba zálohování. Tato doba se odvíjí především od typu a množství použitých akumulátorů. Mezi další důležitý parametr UPS je činitel přetížení a podmínky provozu v krátkodobém přetížení. Většina UPS dokáže krátkodobě dodat výkon cca 150%, to ovšem nemusí být dostatečné například pro start motorů, či sepnutí elektromagnetických ventilů, které mohou při zapnutí vyžadovat například  $6 \times I_n$ .

### 7.3.2 Dimenzování záložního zdroje

Jelikož je zapotřebí bez výpadku napájet jak obvody 24V, tak některé zařízení pracující na 230V jako elektromechanické brzdy apod. Z tohoto důvodu je výhodné napájet obvody 24V ze stejnosměrné sítě, ke které jsou přes oddělovací obvod paralelně připojeny baterie. V případě výpadku napájení bez prodloužení dojde k napájení z těchto akumulátorů.

K této síti je připojen střídač pro 230V/60Hz napájející důležité bezpečnostní obvody a elektromechanické brzdy. Tento pracuje pouze při výpadku napájení sítě 230V/60Hz. Takto navržená UPS je hybridního charakteru, kdy obvody 24V= jsou napájeny bez jakéhokoli přerušení napájení, zatímco v zálohované síti 230V/60Hz dochází k přepnutí na napájení ze střídače se zpožděním několik ms.

Z výkonové bilance jsme zjistili, že celkový odběr v síti 24V= je 370A, z toho je 230A pro střídač 5kVA 230V/60Hz, který je, ale v provozu pouze při výpadku napájení a zbylých 140A je pro napájení periferií v rozvaděčích.

Celková doba zálohování  $t_{min}$  by měla být alespoň 1 hodinu, než dojde k obnově napájení v hlavní napájecí větvi, případně nastartování záložních generátorů. Jako pro rezervu zvýšíme dobu zálohy na 1,5h

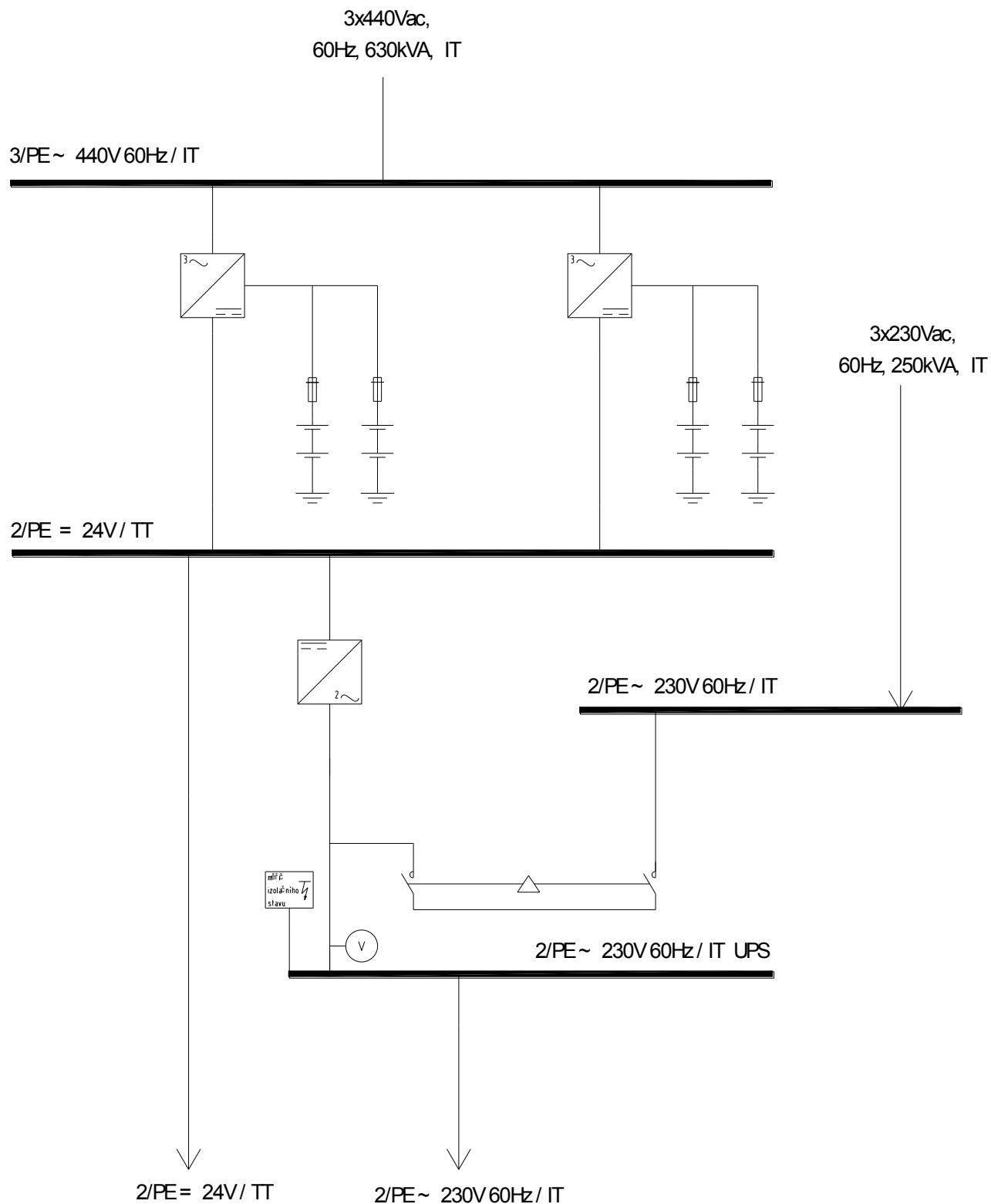
Potřebná kapacita akumulátorů  $Q$  tedy při  $U_n = 24V$  bude:

$$Q = I \cdot t_{min} \quad [Ah, A, h] \quad (7.4)$$
$$Q = 370 \cdot 1,5 = 555Ah$$

Jelikož bude potřeba danou kapacitu složit ze sérioparalelní kombinace článků 12V vhodná kapacita se jeví použití typu baterií Mastervolt MVG12/140, kdy dosažená nominální kapacita této skupiny 8ks bude 560Ah.

Zdroje 24V= musí být schopné pokrýt požadavky jak na normální provoz, tak na provoz při nabíjení baterií po výpadku napájení. Pro tento účel byl vybrán typ Mass 24/100 3-ph.

Střídač je o výkonu 5kVA, typ Mass Sine 24/5000 (230V/60Hz), tento střídač pracuje s účinností 92% nominální proud 230A, jištění pojistkami T250A. připojení ke sběrnici 24V= bude pomocí kabelů Helkama-Bica LKSM-HF 1x95mm<sup>2</sup>, jejichž dovolené proudové zatížení je při teplotě okolí 45°C,  $I_{max} = 284A$ . Odpovídajícím průřezem dle zatížení jsou napájeny všechny další odběrné místa.

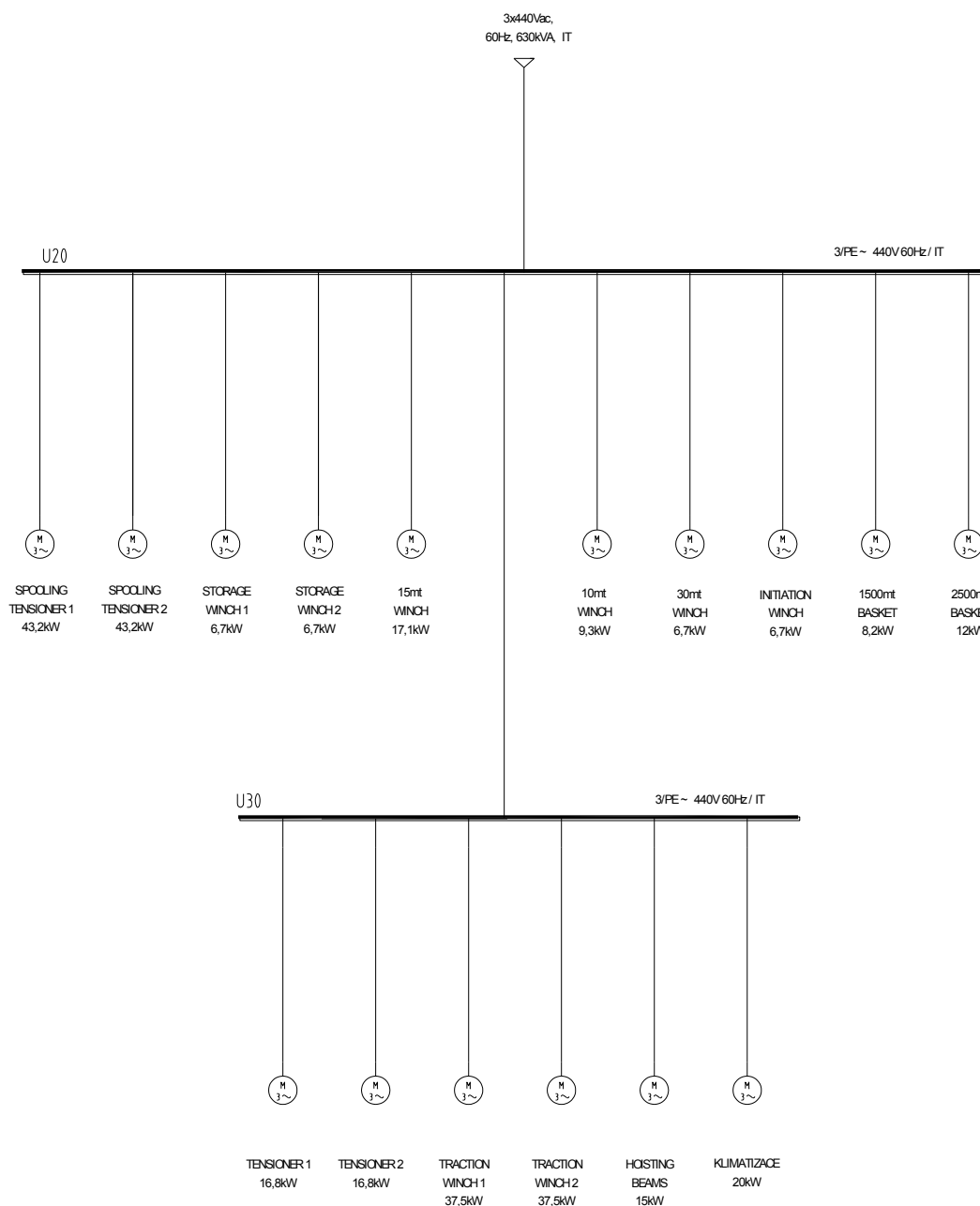


Obr. 36: Přehledové schéma nepřetržitého napájení 24VDC + 230V/60Hz

## 8 Analýza a porovnání zkratových poměrů dle IEC 61363-1 a ČSN EN 60909-0

### 8.1 Výpočet zkratových poměrů

Výpočet zkratových poměrů je proveden v síti 3/PE ~ 440V 60Hz / IT, která je určena hlavně pro napájení asynchronních motorů určených pro chlazení a mazání hlavních systémů. Přehledové schéma lze vidět na obr. 37.



Obr. 37: Jednopolové schéma sítě 440V/60Hz

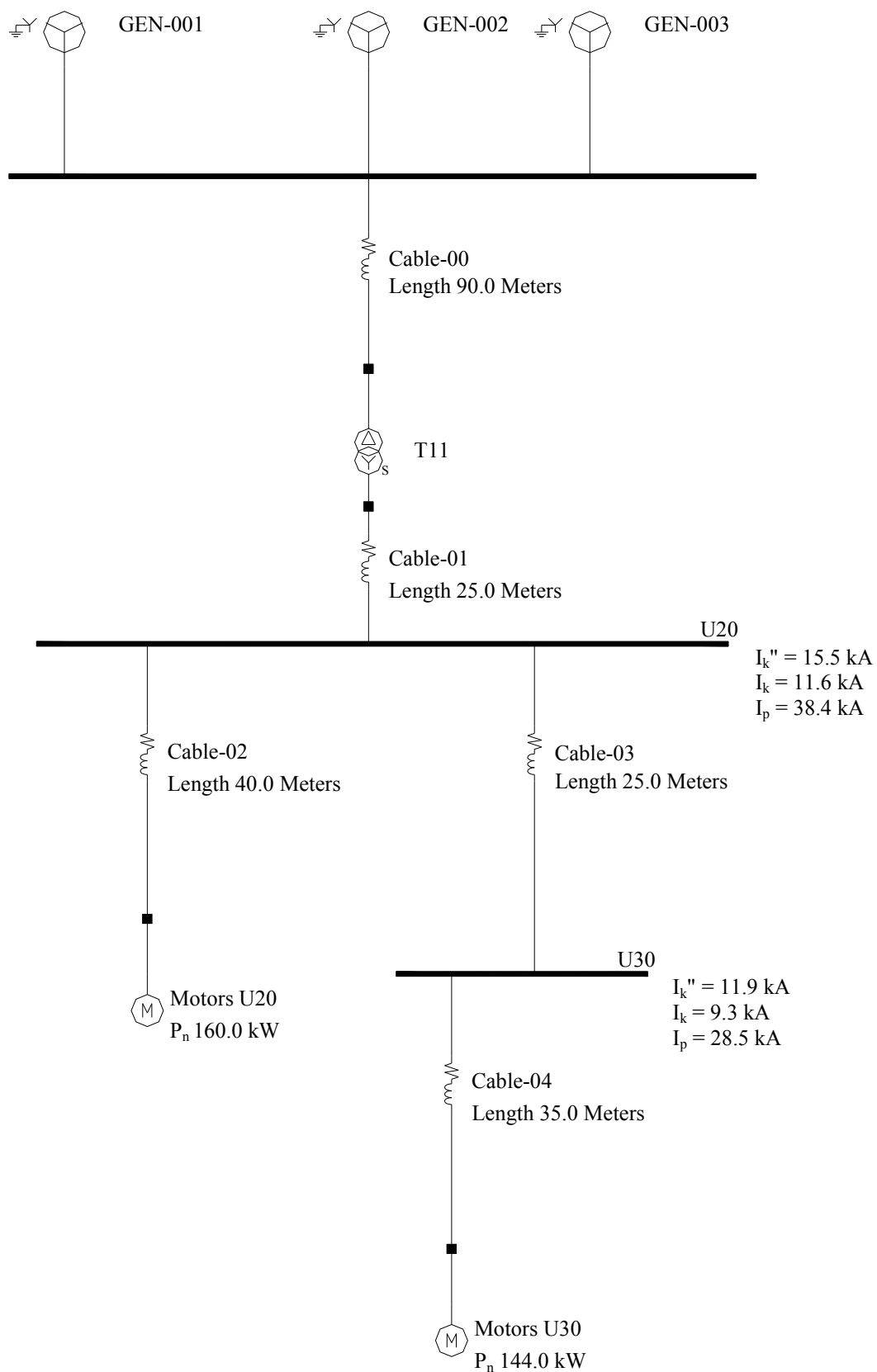
jelikož lze skupiny motorů považovat za jeden ekvivalentní motor, lze tuto síť tedy zjednodušit na jednoduchou síť tvořenou síťovým napáječem, dvěma rozvodnami U20 a U30, ke kterým jsou připojeny pouze ekvivalentní motory.

## 8.2 Analýza sítě dle SKM POWER TOOLS

Program firmy SKM System Analysis, Inc. má velmi obsáhlé možnosti analyzování sítí. Pomocí modulů pro kontrolu sítě dle zkratových poměrů, lze tak učinit jak dle normy ČSN EN 60909-1 tak i dle IEC 61363-0. Vztahy, dle kterých tento program analyzuje zkratové poměry sítě lze nalézt v kapitole 4.

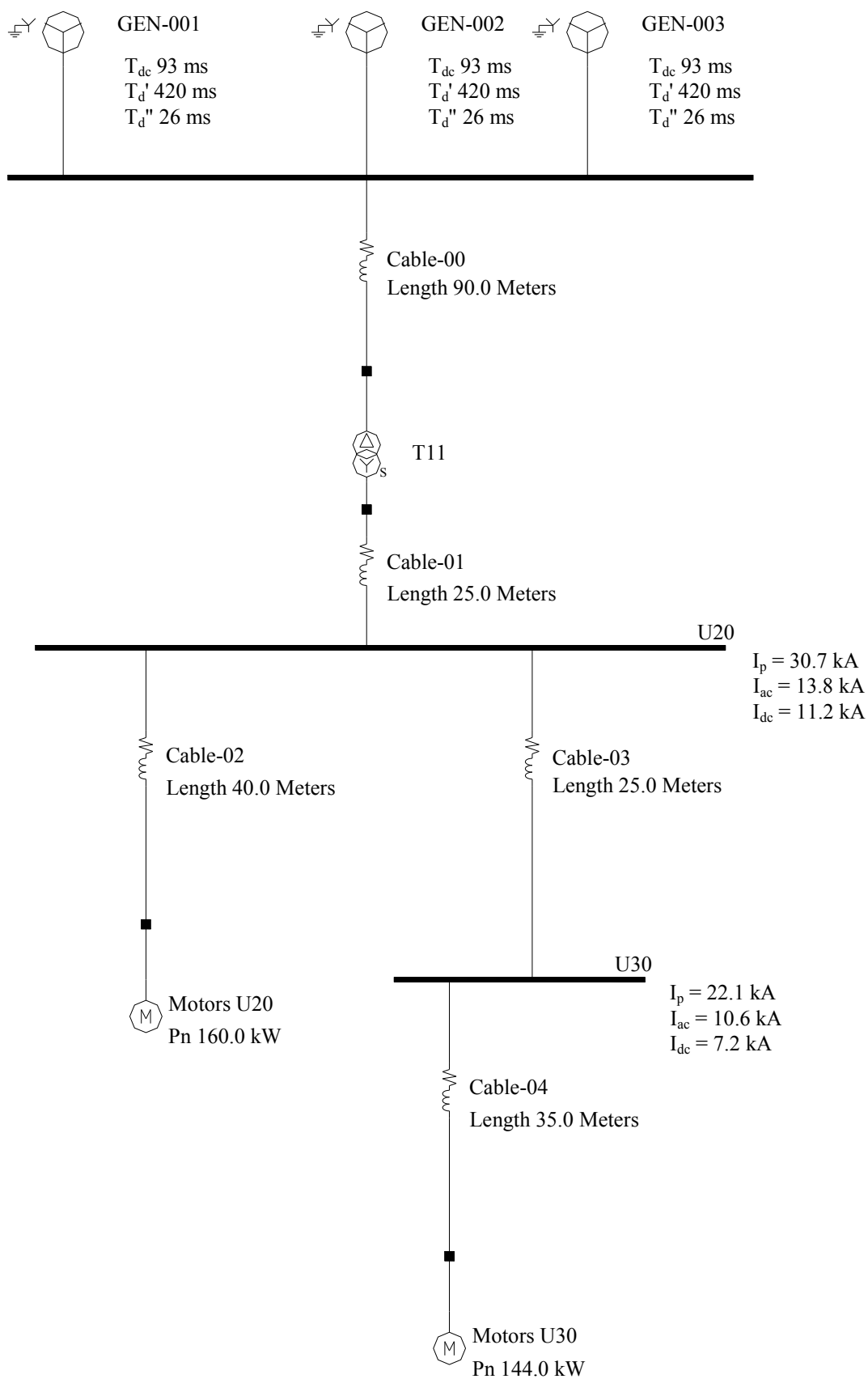
### Parametry prvků sítě:

$U_n$ generátorů	6600V/60Hz
Časové konstanty generátorů	$T''_d = 26 \text{ ms}$ , $T'_d = 420 \text{ ms}$ , $T_{dc} = 93 \text{ ms}$ .
$P_n$ generátorů 001-003	2200kW
$S_n$ transformátoru T11	630kVA
$u_k$ transformátoru T11	5,6%
$U_{1n}$ T11	6600V
$U_{2n}$ T11	440V
Kabel-00	$l=90\text{m}$ , $S=70\text{mm}^2$
Kabel-01	$l=25\text{m}$ , $S= 8//3 \times 70\text{mm}^2$
Kabel-02	$l=40\text{m}$ , $S= 3 \times 150\text{mm}^2$
Kabel-03	$l=30\text{m}$ , $S= 3 \times 70\text{mm}^2$
Kabel-04	$l=35\text{m}$ , $S= 3 \times 150\text{mm}^2$
$P_n$ skupina motorů U20	160kW
$P_n$ skupina motorů U30	144kW



Obr. 38: Zjednodušené schéma sítě 440V/60Hz – analýza dle ČSN EN 60909-0





Obr. 39: Zjednodušené schéma sítě 440V/60Hz – analýza dle IEC 61363

### 8.2.1 Porovnání výsledků

V následujících tabulkách jsou shrnuty zkratové poměry vypočtené programem SKM.

Tabulka 11: *Zkratové poměry – srovnání jednotlivých výpočtových metod rozvodna U20*

Sběrnice rozvodny U20		
Norma	ČSN EN 60909-0	IEC 61363-1
Zkratový proud	[kA]	[kA]
$I_k''$	15,5	13,8
$I_p$	38,4	30,7

Tabulka 12: *Zkratové poměry – srovnání jednotlivých výpočtových metod rozvodna U30*

Sběrnice rozvodny U30		
Norma	ČSN EN 60909-0	IEC 61363-1
Zkratový proud	[kA]	[kA]
$I_k''$	11,9	10,5
$I_p$	28,5	22,1

Z uvedených výsledků je patrné, že hodnoty zkratových proudů, vypočtených dle normy ČSN EN 60909-0 jsou vyšší, než podle normy IEC 61363-0.

Ještě přesnější hodnoty zkratových proudů je možné zjistit analyzováním této sítě pomocí metod konečných prvků, která modeluje zkratový proud bez zjednodušujících předpokladů. Tyto numerické metody počítají s oteplováním vodičů při zkratu, odbuzování synchronního generátoru, apod. Pro přesné hodnoty výpočtu je nutné mít přesné vstupní parametry, které často nejsou ani k dispozici, nebo je potřeba si je zvlášť vyžádat od výrobce.

Pokud tedy budeme dimenzovat síť dle normy ČSN EN 60909-0 nebo IEC 61363-0, nebude výsledek menší než reálná hodnota zkratového proudu a tedy zvolená zařízení vyhoví s rezervou.

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo uvést do problematiky elektrických instalací v námořních aplikacích a provést návrh a analýzu poměrů v elektrické síti. Loď, pro kterou jsou výpočty prováděny, je vybavena systémem pro pokládání potrubí na mořské dno. Úkolem tohoto potrubí je při zvýšené produktivitě šetřit čas a peníze. Aby byly tyto předpoklady splněny, je nanejvýš důležité, aby loď pokládající toto potrubí pracovala spolehlivě za všech okolností. Každý den, kdy je zařízení z důvodu poruchy mimo provoz, způsobuje milionové ztráty. Oproti instalacím na pevnině, obsahují systémy na lodi jiné bezpečnostní požadavky. Bezpečnost celého plavidla je na prvním místě a jakékoliv škody na zařízeních či přepravovaných materiálech jsou až na místě druhém. Například, kdy by došlo k přetížení jeřábu, je tento vybaven systémem, který nouzově odhodí břemeno (to samozřejmě nemůže být v tu chvíli nad palubou). Může dojít k poškození lan, břemene, či jeřábu, ale nesmí být ohroženo celé plavidlo. Všechny tyto předpoklady je nutné brát v úvahu, a například veškeré pohony je v rámci dlouhodobé spolehlivosti lepší s mírou předimenzovat.

Celá diplomová práce je rozdělena do osmi kapitol. Tyto na sebe navazují a po krátkém pojednání o systémech a zařízeních instalovaných na lodi, je připraven teoretický podklad pro návrh elektrického systému. Při výpočtech zkratových poměrů, které jsou velmi důležité pro dimenzování všech připojených zařízení, není vhodné na lodních a mobilních instalacích postupovat dle normy ČSN EN 60909-0. Výpočty je nutné provést dle mezinárodní normy IEC 61363-1, která má metodiku lehce odlišnou a uvažuje s některými parametry, které při výpočtech dle normy ČSN EN 60909-0 zanedbáváme a naopak. Proto se výsledky zjištěné těmito normami mohou výrazně lišit. Porovnání těchto dvou norem je v kapitole 8. Toto porovnání vychází z analýzy stejné části sítě 3x440V/60Hz pomocí softwaru SKM Power Tools. Výpočty zkratových proudů lze provádět více způsoby, než jsou v této práci uvedeny. Existují postupy, které jsou zakotvené v amerických normách ANSI/IEEE, nebo dle výpočetních programů, které pomocí metod konečných prvků simulují zkrat a uvažují veškeré měnící se parametry v průběhu zkratu. Mezi nejdůležitější hodnoty, které je nutné zjistit, jsou vrcholové hodnoty zkratových proudů, protože tyto hodnoty určují velikost dynamických sil v postižené části elektrického rozvodu. Dále je nutné ověřit, zda jisticí prvky budou schopny tyto zkratové proudy spolehlivě vypnout, a zda zařízení, jako jsou sběrné kroužky u jeřábů, vyhoví maximálnímu oteplení proudovodných drah a nedojde k jejich zničení.

Celá elektrická soustava na lodi je charakterizována poměrně velkými výkony na malé ploše. Součet instalovaných výkonů generátorů na lodích s instalovaným systémem pokládky jsou desítky MVA. Rozvody jsou převážně v hladinách nízkého napětí do 690V~, a pouze páteří rozvod mezi hlavními odběrnými místy a pohony celé lodi bývá na hladině VN 6/6,6kV 50/60Hz. V instalacích na lodích bývá často užito nezvyklých kombinací napětíových hladin a frekvencí sítě. Proto je při návrhu nutné ověřit kompatibilitu všech komponent.

Tato práce se kromě návrhu průřezů přípojníc stejnosměrné sběrnice zabývá i využitím stejnosměrného přenosu energie nejen mezi jednotlivými pohony v systému pokládky, ale také s pohony a odběrnými místy na celé lodi. Díky masovému použití měničů a střídačů připojeným k rozvodům stejnosměrného vysokého napětí, by bylo možné optimálně využívat generátory pracující s proměnnou frekvencí. Plavidla vybavena tímto systémem, by měly vyšší účinnost celé elektrické sítě, a tím pádem nižší spotřebu paliva.

## Seznam literatury

- [1] ČSN EN 60909-0. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách: Část 0: Výpočet proudů*. Český normalizační institut, 2002.
- [2] Pauza, J.: *Zkrat v elektrických rozvodech*, Praha, SNTL, 1970.
- [3] Pauza, J.: *Silnoproudá rozvodná zařízení v průmyslu*, Praha, SNTL, 1974.
- [4] Krychtálek, Z. Pauza, J.: *Elektrické stanice*, Praha, SNTL, 1989.
- [5] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*, Praha, SNTL, 1987.
- [6] Hodinka, M., Fecko, Š., Němeček, F.: *Přenos a rozvod elektrické energie*, Praha, SNTL 1989.
- [7] Horák, K.: *Výpočet elektrických sítí*, Praha, SNTL 1980.
- [8] Novotný, V., Vávra, Z.: *Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí*, Praha, SNTL, 1986.
- [9] *ABB technical guide* [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: [http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/cb7f0073c500534bc1257d4f00495b5b/\\$file/TechnicalGuideBook\\_EN\\_3AFE64514482\\_RevH.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/cb7f0073c500534bc1257d4f00495b5b/$file/TechnicalGuideBook_EN_3AFE64514482_RevH.pdf)
- [10] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. Ostrava: Vydala VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008.
- [11] Trojánek Z., Hájek J., Kvasnica P.: *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách*, SNTL/ALFA 1987.
- [12] Meduna V., Koudelka C.: *Druhy rozvodných sítí*, uč texty VŠB – Ostrava, 2006, 14s
- [13] ČSN 33 2000-4-41 ed.2 *Elektrické instalace nízkého napětí – část 4-41: Ochrana opatření pro zajištění bezpečnosti – Ochrana před úrazem elektrickým proudem*. Český normalizační institut, 2007.
- [14] ČSN 33 2000-5-54 ed. 3. *Výběr a stavba elektrických zařízení - Uzemnění a ochranné vodiče*. Český normalizační institut, 2012.
- [15] [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.joomag.com/magazine/metal-bulletin-global-transmission-linepipe-market/0112609001398276073?page=4>
- [16] DET NORSKE VERITAS – DNV. *Rules for classification of ships/high speed, light craft and naval surface craft.: part 4*. 2008.
- [17] *ABB Onboard Grid* [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://new.abb.com/marine/marine/systems-and-solutions/power-generation-and-distribution/onboard-dc-grid>
- [18] IEC 61363-1. *Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units – Part 1: Procedures for calculating short-circuit currents in three-phase a.c.* IEC, 1998.

## Seznam obrázků

- Obr. 1. *Metoda S-lay* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay>
- Obr. 2. *Metoda J-lay* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay>
- Obr. 3. *Metoda Reel-lay* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay>
- Obr. 4. *Metoda Flex-lay* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay>
- Obr. 5. *Lod' s instalovaným systémem pokládky* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay>
- Obr. 6. *250mt tensioner* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay>
- Obr. 7. *Pipe straightener* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay>
- Obr. 8. *Jeřáb se zalomeným výložníkem 120mt* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
[http://www.huismanequipment.com/en/products/cranes/knuckleboom\\_cranes](http://www.huismanequipment.com/en/products/cranes/knuckleboom_cranes)
- Obr. 9. *Basket v podpalubí* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
[http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay\\_components](http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay_components)
- Obr. 10. *Traction Winch* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
[http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay\\_components](http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay_components)
- Obr. 11. *Moonpool* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.darkenergybiosphere.org/classroomconnection/2011/week-6-questions>
- Obr. 12. *Střídavá síť TN-C [12]*
- Obr. 13. *Střídavá síť TN-S [12]*
- Obr. 14. *Střídavá síť TN-C-S [12]*
- Obr. 15. *Střídavá síť IT [12]*
- Obr. 16. *Střídavá síť TT, [12]*
- Obr. 17. *Hlídač izolačního stavu a externí jednotka* [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.bender-de.com/en/products/c/insulation-monitoring/main-circuits/isometerR-irdh275.html>
- Obr. 18. *Schematické znázornění sítě s izolovanou nulou [11]*
- Obr. 19. *Schematické znázornění sítě s izolovanou nulou při zemním spojení [11]*

- Obr. 20. Schématické znázornění vlivu zhášecí tlumivky [11]
- Obr. 21. Průběh zkratového proudu s konstantní střídavou složkou [1]
- Obr. 22. Charakteristiky zkratů a jejich proudů [1]
- Obr. 23. Schéma soustavy [1]
- Obr. 24. Náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy [1]
- Obr. 25. Sousledná složka zkratové impedance  $Z_{(1)}$  [1]
- Obr. 26. Zpětná složka zkratové impedance  $Z_{(2)}$  [1]
- Obr. 27. Netočivá složka zkratové impedance  $Z_{(0)}$  [1]
- Obr. 28. Trojvinutový transformátor
- Obr. 29. Zjednodušené přehledové schéma stejnosměrné sítě
- Obr. 30. Měděné přípojnice v rozvaděčích
- Obr. 31. Jednopolové schéma střídavé sítě
- Obr. 32. Jednopolové schéma stejnosměrné sítě
- Obr. 33. Soustava pohonů multidrive ABB ACS800 [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/power-generation-and-distribution/drilling-drives-system>
- Obr. 34. Profil rychlosti při rozběhu a zastavení
- Obr. 35. Vodou chlazený brzdový rezistor SINUS JEV $\Omega$  [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.sinusjevi.com/products/water-cooled-load-banks>
- Obr. 36. Přehledové schéma nepřetržitého napájení 24VDC + 230V/60Hz
- Obr. 37. Jednopolové schéma sítě 440V/60Hz
- Obr. 38. Zjednodušené schéma sítě 440V/60Hz – analýza dle ČSN EN 60909-0
- Obr. 39. Zjednodušené schéma sítě 440V/60Hz – analýza dle IEC 61363

## Seznam tabulek

Tabulka 1:	<i>Jmenovitá napětí a maximální doby odpojení v sítích IT při druhé poruše:</i>
Tabulka 2:	<i>Průřezy vodiče ochranného pospojování</i>
Tabulka 3:	<i>Napěťový součinitel <math>c</math></i>
Tabulka 4:	<i>Příkony instalovaných systémů 690V/60Hz</i>
Tabulka 5:	<i>Zatížení při jednotlivých provozních stavech 690V/60Hz</i>
Tabulka 6:	<i>Zatížení v úseku U12 při jednotlivých provozních stavech 690V/60Hz</i>
Tabulka 7:	<i>Zatížení při jednotlivých provozních stavech 440V/60Hz</i>
Tabulka 8:	<i>Zatížení při jednotlivých provozních stavech 230V/60Hz</i>
Tabulka 9:	<i>Zatížení záložní zdroj 24VDC</i>
Tabulka 10:	<i>Výběr měničů</i>
Tabulka 11:	<i>Zkratové poměry – srovnání jednotlivých výpočtových metod rozvodna U20</i>
Tabulka 12:	<i>Zkratové poměry – srovnání jednotlivých výpočtových metod rozvodna U30</i>



## Seznam příloh

### Příloha A – fotografie jednotlivých systémů

6 str.

- Obr. I: Flex-lay [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/flexlay>
- Obr. II: Seven Oceans Subsea 7 – Multilay – Reel-lay [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
[http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/reel\\_lay](http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/reel_lay)
- Obr. III: Saipem – J-lay [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
<http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/jlay>
- Obr. IV: Tensioner [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
[http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay\\_components/pipe\\_tensioners](http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay_components/pipe_tensioners)
- Obr. V: Aligner + Carousel [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:  
[http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay\\_components/reel\\_drive\\_systems](http://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay_components/reel_drive_systems)

# **Přílohy**

## Příloha A

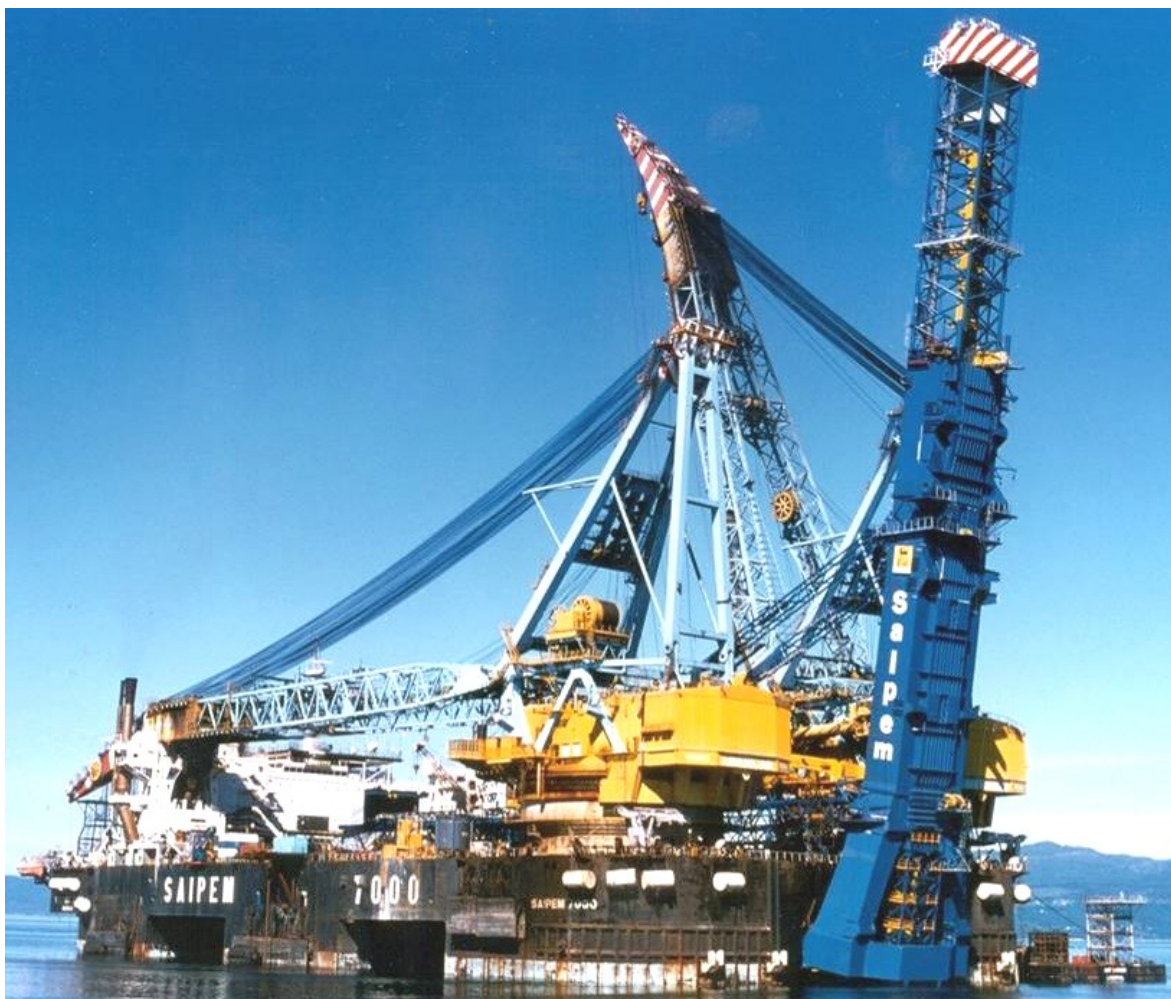
### Fotografie jednotlivých systémů



*Obr. I: Flex-lay*



*Obr. II: Seven Oceans Subsea 7 – Multilay – Reel-lay*



*Obr. III: Saipem – J-lay*





*Obr. IV: Tensioner*



*Obr. V: Aligner + Carousel*